



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LASSI-PEKKA TASKINEN HISSIN JOHTEEN RAKENTEEEN OPTIMOINTI

Diplomityö

Tarkastajat:

yliopistonlehtori Jouko Nieminen

yliopistonlehtori Sami Pajunen

Tarkastajat ja aihe hyväksytty

Luonnontieteiden tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 4.6.2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknis-luonnontieteellinen koulutusohjelma

TASKINEN, LASSI-PEKKA: Hissin johteen rakenteen optimointi

Diplomityö, 49 sivua

Syyskuu 2014

Pääaine: Teknillinen fysiikka

Tarkastajat: yliopistonlehtori Jouko Nieminen, yliopistonlehtori Sami Pajunen

Avainsanat: Optimointi, monitavoiteoptimointi, simulointi, hissin johde

Tässä diplomityössä tutustutaan hissin johteen rakenteeseen ja sen optimointiin. Työn tavoitteena on rakentaa laskentamalli, jota käyttämällä voidaan optimoida rakenteen massaa. Analyysit tehdään ANSYS-elementtimenetelmäohjelmistolla ja optimointi suoritetaan käyttäen SimPro-laskentatyökalua, jonka soveltuvuutta rakenteiden optimointiin selvitetään tämän tutkimuksen myötä.

Tutkimuksessa optimoitavat parametrit ovat rakenteeseen liittyviä pituusmittoja ja johteen poikkileikkaus. Rajoittavana tekijänä optimoinneissa toimii johteen taipumasta aiheutuva kulma. Lisäksi on kokeiltu optimoida yhtä aikaa sekä rakenteen massaa että johteen taipumasta syntyvää kulmaa monitavoiteoptimointia käyttäen.

Tutkimuksen tuloksina on saatu optimaaliset parametriyhdistelmät suunnittelumuuttujille tapauksiin, joissa suunnittelumuuttujien arvot ovat eri tavoin rajoitettuja. Näiden tulosten pohjalta on tutkittu, kuinka herkkä optimiratkaisu on kunkin suunnittelumuuttujan arvon muutokselle. Optimointiin käytetty SimPro-laskentatyökalu osoittautui helppokäyttöiseksi ja rakenteiden optimointiin soveltuvaksi työkaluksi, jonka avulla saadaan paljon tietoa tutkittavasta ongelmasta.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Science and Engineering

TASKINEN, LASSI-PEKKA: Structural optimization of an elevator guide rail

Master of Science Thesis, 49 pages

September 2014

Major: Advanced Engineering physics

Examiner: Associate Professor Jouko Nieminen, Associate Professor Sami Pajunen

Keywords: Optimization, multiobjective optimization, simulation, elevator guide rail

This thesis concentrates on structure of an elevator and more specifically on elevator guide rails. The purpose of this thesis is to build a calculation model which can be used to optimize mass of the structure. Structural analyses are carried out with finite element software ANSYS and the optimizations are executed using SimPro optimization tool, which feasibility for structural optimization is under review during this study.

The design parameters to be optimized are cross section of the guide rail and measures of length related to the structure. The optimization constraint is an angle caused by bending of guide rail. Furthermore, it has been tested to optimize both mass and the angle simultaneously in the form of multiobjective optimization.

The optimal parameter combinations for the design parameters has been found for several different cases in which the design parameter values are restricted in various ways. Based on the results it has been studied how sensitive the optimal solution is on change of each design parameter. SimPro optimization tool proved to be a handy and suitable tool for structural optimizations.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston teknillisen fysiikan pääaineeseen. Työn teettäjänä toimi Tampereen teknillisen yliopiston Kone- ja tuotantotekniikan laitos.

Esitän kiitokset ohjaajalleni yliopistonlehtori Sami Pajuselle loistavasta ohjauksesta työni eri vaiheissa sekä työn tarkastamisesta. Työkavereistani haluan kiittää erityisesti Antti Ylistä kommentteista ja tuesta diplomityön aikana. Diplomityön tarkastamisesta ja saamistani kommentteista kiitän yliopistonlehtori Jouko Niemistä.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni vuosien varrella saamastani kannustuksesta ja tuesta niin opintojen kuin muunkin elämän suhteen.

Tampereella 3. syyskuuta 2014

Lassi-Pekka Taskinen

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
2. Tutkittava rakenne	2
3. Optimointimenetelmien teoriaa	8
3.1 Optimointitehtävän muotoilu	8
3.2 Optimointimenetelmät	10
3.3 Monitavoiteoptimointi	12
4. Tutkimustehtävän kuvaus	15
4.1 Johteen taipumisen aiheuttama kulma	15
4.2 Kulman muodostumiseen vaikuttavat kuormitukset	16
5. Laskentamalli	20
5.1 Johteiden lukumäärän vaikutus tuloksiin	20
5.2 Elementtiverkko	21
5.3 Kuormitukset ja reunaehdot	22
5.4 Johdejatkoslevy	23
5.5 Johdekiinnike	24
5.6 Yksinkertaistukset	25
6. Optimointitehtävän formulointi	26
6.1 Suunnittelumuuttujat	26
6.2 Kohdefunktio ja rajoitusehdot	29
6.3 Monitavoiteoptimointi	30
7. Tulokset	32
7.1 Optimoinnit standardiprofileilla	32
7.2 Rajoitetut suunnittelumuuttujat	33
7.3 Jatkuvat arvot poikkileikkauksen mitoille	35
7.4 Herkkyysanalyysit	36
7.5 Monitavoiteoptimointi	41
7.6 SimPro-laskentatyökalun käyttäminen	43
8. Johtopäätökset	45
Lähteet	47

LYHENTEET JA SYMBOLIT

α	Rajoitusehtona toimiva kulma
λ, σ	Lagrangen kerroinvektorit
\mathcal{L}	Lagrangen funktio
∇	Gradientti
\mathbb{R}^n	n-ulotteinen reaalilukuavaruus
b_i	Painokerroin
f	Kohdefunktio
F_x, F_y	Johteisiin kohdistuvat voimat
g, h	Rajoitefunktiot
G	Hissikorin paino
h_0	Poikkileikkauksen korkeus
h_{mv}	Väännön laskennassa käytettävä momenttivarsi
k_x, k_y	Jousivakiot
l	Rakenteen pituus
L_B	Johdekiinnikkeiden välinen etäisyys
L_{GR}	Johteen pituus
L_R	Rullaohjainten välinen etäisyys
N	Hissikoria kannatteleva vaijerivoima
m	Rakenteen massa
\mathbf{S}	Suunnitteluavaruus
t_1, t_2, t_3	Johteen poikkileikkauksen paksuusmittoja
u	Siirtymä x -suunnassa
U	Kokonaissiirtymä
v	Siirtymä y -suunnassa
w_1, w_2, w_3	Johteen poikkileikkauksen pituusmittoja
\mathbf{x}	Muuttujavektori
FEM	<i>Finite element method</i> , elementtimenetelmä
LP	Lineaarinen optimointi
NLP	Epälineaarinen optimointi
max	Maksimi
MILP	Lineaarinen sekalukuoptimointi
MINLP	Epälineaarinen sekalukuoptimointi
min	Minimointi
PK	Pintakeskiö
PL	Poikkileikkaus
RSM	<i>Response surface method</i> , vastepintamenetelmä
SQP	<i>Sequential quadratic programming</i>

1. JOHDANTO

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on optimoida hissin liikettä ohjaavaa, johteeksi kutsuttua pystysuoraa palkkia ja sen tukirakennetta sekä selvittää SimPro-laskentatyökalun [1] soveltuvuutta käytännön rakenteen optimointiongelmiiin. SimPro-laskentatyökalua on kehitetty meneillään olevassa Tekes-projektissa "SIMPRO - Laskennalliset menetelmät konetekniikan tuotekehityksessä", johon myös tämä diplomityö on tehty.

Optimoinnin kohteena on rakenteen massa ja rajoittavina tekijöinä johteen siirtymät sekä johteen taipumisesta syntyvä kulma. Optimoitavat parametrit ovat rakenteeseen liittyviä pituusmittoja ja johteen poikkileikkaus. Työssä on kokeiltu myös optimoida sekä rakenteen massaa että johteeseen syntyvää kulmaa yhtä aikaa monitavoiteoptimoinnin muodossa.

Johde on T-profilipalkki, joka ohjaa hissikorin kulkua hissikuilussa. Hätätapauksessa hissikori pysäytetään johteiden varaan, minkä vuoksi ne ovat yksi tärkeimpiä tekijöitä hissin turvallisuutta ajatellen [2]. Tässä tutkimuksessa keskitytään kuitenkin optimoimaan rakennetta pelkästään massan ja johteen taipuman aiheuttaman kulman kannalta, ja poikkeustilanteiden mukaiset kuormitustapaukset jätetään huomioimatta.

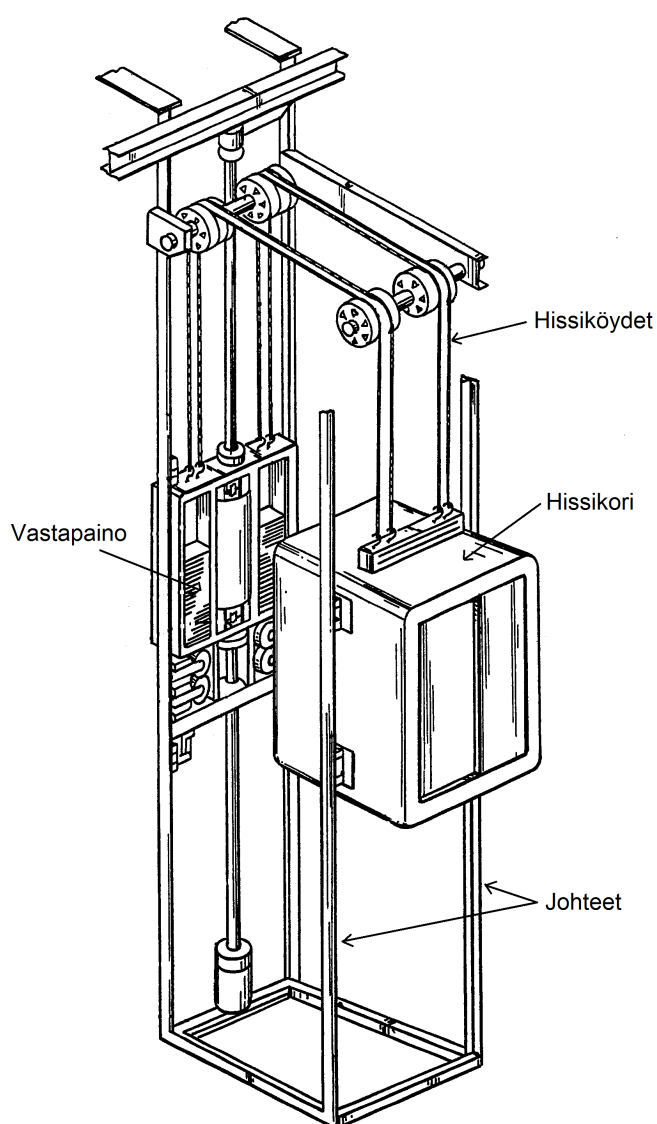
Tulevaisuudessa uusi teknologia ja entistä lujemmat ja kevyemmät materiaalit mahdollistavat pitkien (jopa 1000 m) yksilinjaisten hissikuilujen rakentamisen [3], jolloin rakenteiden tulee olla mahdollisimman kevyitä. Pienikin vähennys rakenteiden massassa saa aikaan merkittäviä säästöjä materiaalikustannuksissa.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on rakentaa laskentamalli ja -menetelmä, joita käyttämällä johteen ja sen tukirakenteen massa saadaan optimoitua erilaisiin kohteisiin ilman johteen taipumisesta syntyvän kulman kasvamista sallittua suuremmaksi. Rajoittavia tekijöitä voivat olla vaikka kerroskorkeus, hissikorin koko tai tilattujen johteiden pituus.

Kahdessa seuraavassa luvussa perehdytään hissin rakenteisiin ja optimointimenetelmien teoriaan. Luvussa 4 esitellään tarkemmin kyseessä oleva tutkimustehtävä ja luvuissa 5 ja 6 selostetaan, kuinka tehtävää on mallinnettu ja parametrisoitu optimointia varten. Luvussa 7 esitellään eri tapauksien tulokset ja lopuksi näistä tehdyt johtopäätökset.

2. TUTKITTAVA RAKENNE

Hissi on laite, joka siirtää ihmisiä ja tavaroita pystysuoraan rakennuksissa kerrosten välillä. Nykyaikainen hissilaitteisto koostuu hissikorista, vastapainosta, niitä kannattelevista hissiköysistä ja johteista sekä moottorista, jarruista ja nopeudenrajoitimesta. Kuvassa 2.1 näkyy eräs ratkaisu hissilaitteistosta.



KUVA 2.1: Hissin rakenne. Kuva muokattu lähteestä [4].

Nykyaikaisessa hississä ei ole useinkaan enää erillistä konehuonetta, vaan nostokoneisto sijoitetaan hissikuiluun. KONE Oyj esitteli vuonna 1996 ensimmäisenä valmistajana markkinoille konehuoneettoman hissiratkaisun, joka sai nimekseen MonoSpaceTM. Konehuoneeton hissi mahdollistaa jopa 70% energiansäästön perinteiseen ratkaisuun verrattuna, minkä vuoksi konehuoneeton hissi onkin yleistynyt nopeasti. [5] Kun erillistä konehuonetta ei enää tarvita, myös hissien rakennuskustannukset ovat pienemmät.

Hissikori (*elevator car*) koostuu yleensä kantavasta kehikosta (*car sling*) ja sen sisällä olevasta varsinaisesta korista, joka eristetään kehikosta kumeilla ja jousilla paremman ajomukavuuden saavuttamiseksi. Kehikon tarkoituksena on siis eristää varsinaista hissikoria ajonaikaiselta värähtelyltä. Hissikori voi olla myös itsekantava, jolloin erillistä kehikkoa ei tarvita.

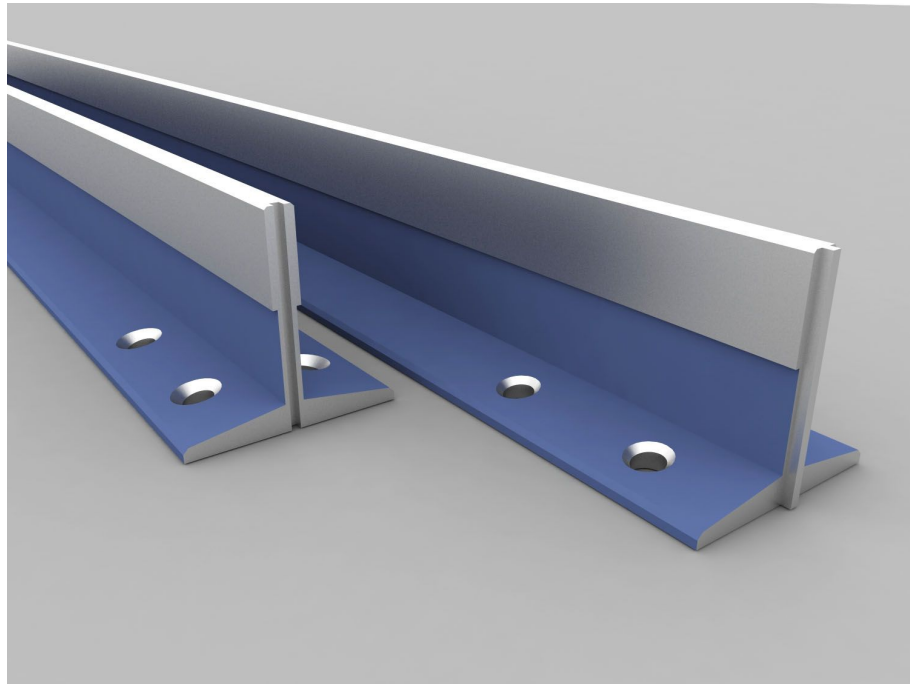
Vastapaino (*counterweight*) on liikkuva massa, jonka tarkoituksena on vähentää hissien moottorin tehon tarvetta ja energiankulutusta. Vastapaino painaa tyypillisesti yhtä paljon kuin kori ja puolet hissien nimelliskuormasta. Kaksi hissiä voidaan myös rakentaa siten, että niiden korit toimivat synkronoidusti vastakkaisiin suuntiin ja ovat näin ollen toistensa vastapainoja.

Hissikori ja vastapaino riippuvat kuvan 2.2 kaltaisten hissiköysien (*elevator rope*) varassa ja liikkuvat kuilussa moottorin ohjaamana näiden välityksellä. Hissiköydet ovat useimmiten 8-säikeisiä teräsköysiä, joiden ydin on kuitua tai terästä. Myös 6- ja 9-säikeisiä hissiköysiä on saatavilla. [6]



KUVA 2.2: Hissiköysiä. [7]

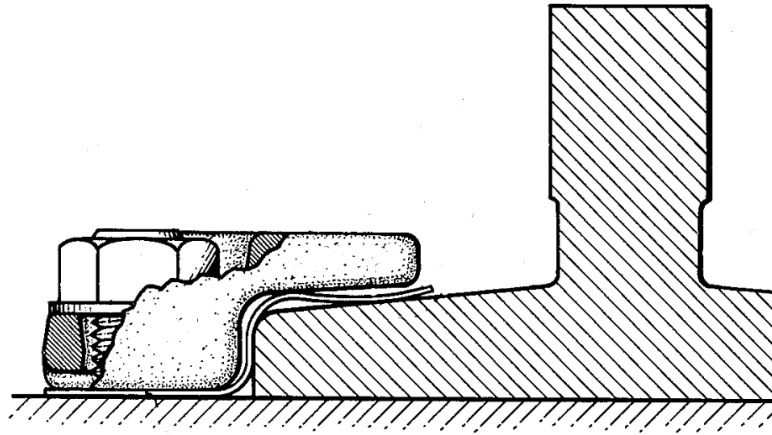
Hissin perusrakenteeseen kuuluvat myös johteet (*guide rail*), jotka ohjaavat hissiä ja vastapainoa niiden pystysuorassa liikkeessä. Johde on tyypillisesti T-profiilin kisko, mutta aikaisemmin johteina on käytetty myös pyöreitä tankoja. Kuvassa 2.3 on esitetty tyypillinen johde, jonka eri päissä on sovitusura ja vastakappale helpottamaan niiden yhteensovittamista. Käytännössä johteet kiinnitetään joko kuilun huipulta (riippuva johde) tai pohjalta. Tämän lisäksi johteet on tuettu hissikuiluun johdekiinnikkeillä, jotka on asetettu säännönmukaisille väleille pitkin kiskoja. [2, 8]



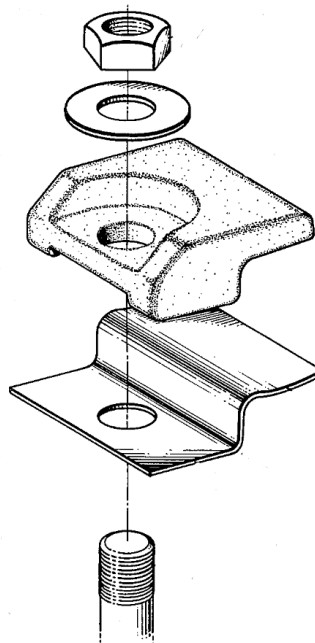
KUVA 2.3: Tyypillinen johde. [9]

Tyypillisesti johteet eivät ole kantava rakenne. Toisin sanoen hissikorin painon kantavat hissiköydet, joiden avulla hissin liikettä kontrolloidaan normaalissa käytössä. Johteet on kuitenkin mitoitettava nurjahduksen suhteen kestäämään hätätapaus, jossa hissikori pääsee vapaaseen pudotukseen. Tässä hätätilanteessa erillinen, tarraajaksi kutsuttu turvalaite pysäyttää hissikorin johteiden varaan. Lisäksi johteisiin kohdistuu käyttötilanteessa poikittaissuuntaisia voimia, jotka aiheuttavat siirtymiä ja johteen taipumisen.

Johdekiinnikkeet (*bracket*) ovat joustavia metallirakenteita, jotka kannattelevat johteita johdetta vastaan kohtisuoraan olevissa suunnissa ja pyrkivät pitämään johteet ennalta määrätyllä etäisyydellä toisistaan. Johdekiinnikkeet liitetään johteeseen ja hissikuiluun klipsejä ja pultteja käyttäen. Johdekiinnikkeen kaksi klipsiä lukitsevat ja puristavat johteen laippapuolen kiinni joko seinään tai palkkiin hissikuilussa. [2] Kuvat 2.4 ja 2.5 esittävät yksityiskohtaisemmin erään ratkaisun johdekiinnikkeen kytkennästä johteeseen.



KUVA 2.4: Johdekiinnikkeen klipsit lukitsevat johteen. Kuva muokattu lähteestä [10].



KUVA 2.5: Klipsin osat. Kuva muokattu lähteestä [10].

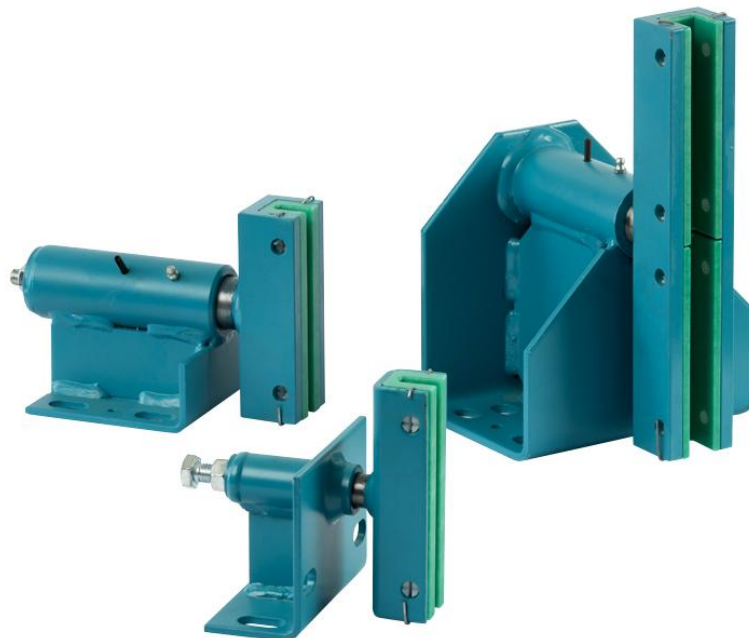
Normaaleissa olosuhteissa käytön aikana johteet yksinkertaisesti ohjaavat hissikorin liikkumista, eikä niihin kohdistu suuria kuormituksia, varsinkaan jos hissikori on hyvin tasapainotettu ja kuorma on jakautunut tasaisesti [11]. Muut kuormitukset johteisiin kohdistuen voivat syntyä esimerkiksi hätätapauksessa, jossa hissikorin paino jää kokonaan johteiden varaan. Nämä kuormitukset voivat olla hyvinkin suuria, riippuen muiden turvavarusteiden tyypistä [12].

Johteet kiinnitetään toisiinsa käyttäen kuvassa 2.6 näkyvää johdejatkoslevyä (*fish plate*). Tämä levy on palkin selkämyksen levyinen ja kiinnittyy kumpaankin johteen ruuviliitoksella.



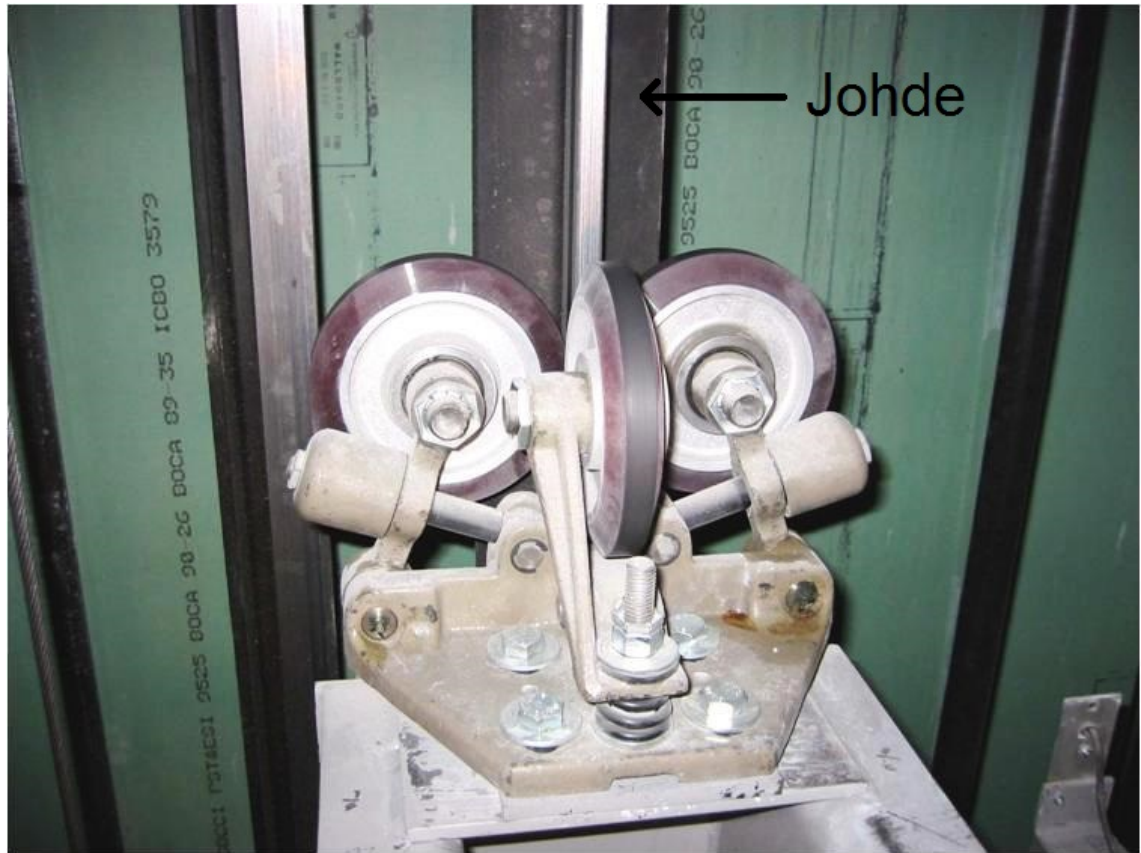
KUVA 2.6: Johdejatkoslevy.

Hissikori tukeutuu johteisiin ohjauskenkien (*guiding shoes*) avulla. Nämä voivat olla liuku- tai rullaohjaimia (*sliding guides, roller guides*). Liukuohjaimen sisäosa on tyypillisesti muovia, joka liukuu metallista johdetta pitkin. Kuvassa 2.7 on esitetty erikokoisia liukuohjaimia.



KUVA 2.7: Erikokoisia liukuohjaimia. [13]

Rullaohjaimessa on kolme pyörivää rullaa, jotka asettuvat johteen ohuen pään ympärille. Kuvassa 2.8 on esitetty rullaohjain paikallaan johdetta vasten. Myös vastapainolla on omat ohjauskengät ja johteet, joita pitkin se liikkuu.



KUVA 2.8: Rullaohjain paikallaan johdetta vasten.

Tässä työssä rajoitutaan tutkimaan hissien johteiden ja niiden tukirakenteen vaikutusta kuormituksessa johteen taipumasta syntyvään kulmaan. Tutkimuksessa otetaan huomioon sekä itse johteen tuomat joustot että myös johdejatkoslevyn ja johdekiinnikkeen vaikutukset. Analyysissä tehdyt yksinkertaistukset ja tarkempi mallinnuksen kuvaus annetaan luvussa 5.

3. OPTIMOINTIMENETELMIEN TEORIAA

Suunnittelijat, insinöörit ja johtajat kohtaavat työssään jatkuvasti ratkaisua kaipaavia ongelmia, kuten haettaessa optimaalista rakennetta, lentokoneen lentoreittiä tai suunniteltaessa niukkojen resurssien allokointia. Menneisyydessä on pidetty hyväksyttävänä suuri määrä erilaisia ratkaisuja, mutta nyt, yhä tiukkenevan kilpailun jatkuessa ei voida tyytyä vain kohtuullisen hyvään ratkaisuun. Nykyään on yhä tärkeämpää löytää ratkaisu, joka mahdollistaa mahdollisimman tehokkaan resurssien käytön.

Optimointi, tarkemmin sanottuna matemaattinen optimointi (*mathematical optimization, mathematical programming*), tarkoittaa prosessia, jossa muotoillaan ongelma ja systemaattisella tavalla pyritään kohti jonkun määritellyn kriteerin mukaan parhaan ratkaisun valintaa mahdollisten vaihtoehtojen joukosta. Matemaattisen optimoinnin historia on verrattain lyhyt ja se alkoi kehittymään vauhdilla vasta toisen maailmansodan aikoihin suurien ja monimutkaisten teknologisten ongelmien myötä. Tietokoneiden yleistymisellä on luonnollisesti ollut valtava merkitys optimointimenetelmien kehittymiseen. Tässä luvussa tutustutaan optimointiin yleisellä tasolla ja esitellään muutamia optimoinnin keskeisiä käsitteitä. [14, 15]

3.1 Optimointitehtävän muotoilu

Määritellään optimointitehtävä yleiseen muotoon

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \quad & \text{s.e.} \\ g_i(\mathbf{x}) &\leq 0, i = 1, \dots, k \\ h_j(\mathbf{x}) &= 0, j = 1, \dots, l \\ \mathbf{x} &\in \mathbf{S} \subset \mathbb{R}^n, \end{aligned} \tag{3.1}$$

missä $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ on muuttujat sisältävä vektori ja f tyypillisesti reaaliarvoinen kohdefunktio (*objective function*), joka kuvaa ratkaisun hyvyttä ja jota minimoidaan. Yhtälörajoitteet h_1, \dots, h_l ja epäyhtälörajoitteet g_1, \dots, g_k muodostavat optimointitehtävän rajoitusehdot (*constraints*). Funktioita f , g_i ja h_j kutsutaan vastefunktioiksi. Joukko \mathbf{S} on suunnitteluavaruus, joka sisältää tyypillisesti muuttujien ylä- ja alarajat.

Tehtävä (3.1) tulee ratkaista siten, että muuttujien x_1, x_2, \dots, x_n arvot toteuttavat

kaikki rajoitusehdot ja samanaikaisesti funktion f arvo minimoituu. Vektorin $\mathbf{x} \in \mathbf{S}$ sanotaan olevan käypä (*feasible*) ratkaisu, kun se toteuttaa kaikki rajoitusehdot. Vastaavasti käypä joukko (käypä alue, *feasible region*) on kaikkien näiden käypien ratkaisujen joukko. [14]

Pistettä, jossa kohdefunktion arvo saavuttaa pienimmän arvonsa, kutsutaan minimiksi. Minimipisteitä voi olla kahdenlaisia. Globaali minimi on piste, jossa funktio saa pienimmän arvon käyvässä joukossa. Lokaali minimi on paikallinen minimipiste, jonka lähistöltä ei löydy parempia pisteitä. Lokaaleja minimejä voi olla yksi tai useampia. Joskus optimoinnin tavoitteena voi olla maksimoida jotain kohdefunktiota. Funktion p maksimointitehtävä voidaan kuitenkin aina muuttaa funktion $f = -p$ minimointitehtäväksi, minkä vuoksi riittää tarkastella vain minimointitehtävän ratkaisemista.

Eräs tärkeä käsite optimoinnissa on konveksisuus. Joukon sanotaan olevan konvekksi (*convex*), kun joukon kahden pisteen välille muodostuvan janan pisteet kuuluvat myös joukkoon eli se sisältää kaikki konveksikombinaationsa. Täsmällisemmin määriteltynä

Joukko $\mathbf{S} \subset \mathbb{R}^n$ on konvekksi, kun kaikille \mathbf{y}_1 ja \mathbf{y}_2 pätee
 $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2 \in \mathbf{S} \Rightarrow \beta \mathbf{y}_1 + (1 - \beta) \mathbf{y}_2 \in \mathbf{S}, \beta \in [0, 1]$.

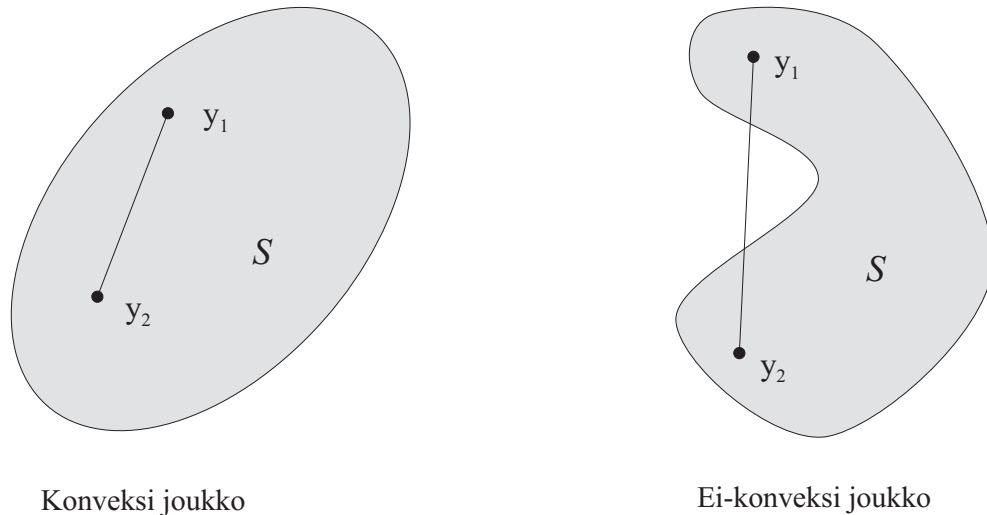
Funktion konveksisuus määritellään

Funktio $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ on konvekksi, kun kaikille \mathbf{y}_1 ja \mathbf{y}_2 pätee
 $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2 \in \mathbb{R}^n \Rightarrow f(\beta \mathbf{y}_1 + (1 - \beta) \mathbf{y}_2) \leq \beta f(\mathbf{y}_1) + (1 - \beta) f(\mathbf{y}_2), \beta \in [0, 1]$.

Optimointitehtävä on konvekksi, kun sen käypä joukko ja kohdefunktio ovat konvekseja. Eräs konveksin tehtävän tärkeä ominaisuus on, että löydetty lokaali minimi on myös globaali minimi. Lineaarinen optimointitehtävä on konveksin tehtävän erikoistapaus. Konveksisuutta joukon tapauksessa on havainnollistettu kuvassa 3.1. [14, 16]

Optimointitehtävät voidaan luokitella muuttujien tyypin mukaan. Muuttujat voivat olla rajoitettuja saamaan jatkuvia tai kokonaislukuarvoja. Diskreetit optimointitehtävät ovat sellaisia, joissa muuttujat saavat vain ennalta määrättyjä arvoja rajatusta joukosta, mutta nämä voidaan aina muuntaa kokonaislukumalleiksi [17]. Jos tehtävässä on sekä diskreettejä että jatkuvia muuttujia, puhutaan sekalukutehtävästä.

Toinen optimointitehtävien luokitteluperuste on siinä esiintyvien funktioiden tyyppi. Jos kaikki vastefunktiot f , g_i ja h_j ovat lineaarisia, optimointitehtävä on lineaarinen (*linear programming*, LP). Vastefunktio on lineaarinen, kun sen käyttäytyminen kaikkien suunnittelumuuttujien suhteen on lineaarista. Mikäli yksikin vastefunktioista on epälineaarinen, optimointitehtävä on epälineaarinen (*nonlinear*



KUVA 3.1: Konvekksi ja ei-konvekksi joukko.

programming, NLP). Lineaarille optimointitehtävälle on kehitetty suuri määrä tehokkaita ratkaisualgoritmeja, kun taas epälineaarinen optimointitehtävä on yleensä huomattavasti hankalampi ja työläämpi ratkaista.

Molemmat luokitteluperusteet yhdistämällä saadaan käytännön tehtävien kannalta yleisimmät tehtävätyypit lineaarinen sekalukuoptimointi (*mixed integer linear programming*, MILP) ja epälineaarinen sekalukuoptimointi (MINLP).

3.2 Optimointimenetelmät

Optimointitehtävän ratkaisuun käytettävän algoritmin valintaan on syytä kiinnittää huomiota. Ei ole olemassa menetelmää, joka toimisi hyvin kaikkien tehtävien ratkaisemisessa. Jotkut algoritmit ovat parempia tietyissä ongelmissa ja kaikille voi löytyä ongelma, jolle juuri kyseinen algoritmi on tehokkain. Tätä kutsutaan ”No free lunch”-teoreemaksi. [18]

Optimointitehtävän ratkaisumenetelmän valintaan tulisi vaikuttaa tehtävän tyyppin lisäksi myös ratkaisulta vaadittavat ominaisuudet, kuten tarkkuus. Numeerinen ratkaisu on kuitenkin parhaimmillaankin vain likiarvo, eikä mitään takeita globaalin optimin löytymiseksi yleensä ole. [19, s.34]

Mikäli optimointitehtävän tunnistetaan olevan jotain erikoistyyppiä, kannattaa käyttää kyseistä tehtävätyyppiä varten kehitettyjä algoritmeja ja menetelmiä. Tällaisia erikoistyyppisiä ovat esimerkiksi lineaarinen, kvadraattinen tai sekalukuoptimointi. Konvekseille tehtäville on olemassa melko tehokkaita, tarkkoja ja heuristisia algoritmeja [20]. Tutkimuksessa [1] on käsitelty ja vertailtu yleisimpien, helposti saatavilla olevien menetelmien ja algoritmien tehokkuutta ja tarkkuutta sekä käytännön ongelmissa että matemaattisissa testiprobleemeissa.

Ratkaisualgoritmit voidaan jaotella iteratiivisiin algoritmeihin ja luettelointime-

netelmiin. Iteratiiviset algoritmit etenevät kohti parempaa tulosta ja hakevat likimääräistä optimia, kunnes suppenemiskriteeri täyttyy. Luettelointimenetelmissä käydään läpi suuri joukko ratkaisuehdokkaita ja päädytään näiden perusteella lopputulokseen. [19, s.37]

Käytännön ongelmat ovat haastavia, koska nämä ovat usein epälineaarisia ja sisältävät diskreettejä muuttujia eli ovat MINLP-tehtäviä. Myöskään vastefunktiot eivät yleensä ole konvekseja [20]. Simulaatioperusteisissa optimoinnissa kohdefunktiota ei tunneta, vaan siitä saadaan tietoa simuloinnin perusteella. Tätä tietoa hyväksi käyttämällä approksimoidaan kohdefunktiota, mitä kutsutaan metamallinnukseksi. Tämän työn optimoinneissa käytetty simulaatioperusteinen menetelmä on vastepintamenetelmä (*Response surface method*, RSM), jota on esitelty tarkemmin lähteessä [21]. Simuloinnin perusteella saatujen vastefunktioiden arvojen perusteella muodostetaan esimerkiksi kvadraattinen metamalli, joka on siis approksimaatio todelliselle vastefunktioiden käyttäytymiselle. Tälle mallille etsitään parasta ratkaisua, jonka mukaan optimoinnissa edetään. Nyt meillä on kvadraattinen optimointiongelma, jonka ratkaisemiseksi tarvitaan optimointimenetelmä. Seuraavaksi esitellään eräs yleisimmistä menetelmistä epälineaarisesti rajoitettujen optimointiongelmien ratkaisemiseen.

SQP (*Sequential quadratic programming*) on iteratiivinen menetelmä epälineaariin optimointiin. Kuten suurin osa optimointimenetelmistä, SQP ei ole vain yksittäinen algoritmi, vaan ennemminkin käsitteellinen menetelmä, josta on kehittynyt useita erillisiä numeerisia menetelmiä. SQP:n perusideana on mallintaa annettua approksimoitua ratkaisua \mathbf{x}_k optimoimalla kvadraattisesti aliongelmaa ja käyttää tämän aliongelman ratkaisua paremman approksimaation \mathbf{x}_{k+1} muodostamisessa. Tätä toistetaan iteratiivisesti, kunnes ratkaisu konvergoi. Sopivalla kvadraattisen aliongelman valitsemisella SQP voidaan nähdä luonnollisena laajennuksena Newtonin ja kvasi-Newtonin menetelmiin rajoitetuissa optimointitehtävissä. [22]

Tehtävän ratkaisussa tarvittava Lagrangen funktio määritellään

$$\mathcal{L}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\sigma}) = f(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{g}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{h}(\mathbf{x}), \quad (3.2)$$

missä $\boldsymbol{\lambda}$ ja $\boldsymbol{\sigma}$ ovat Lagrangen kerroinvektoreita ja $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ sekä $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ rajoitusehdoista kootut vektorit. Jokaisella iteraatiolla \mathbf{x}_k määritetään sopiva etenemissuunta $\mathbf{d}_k = \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k$ ratkaisuna kvadraattiseen aliongelmaan

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{d}_k} & \nabla f(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{d}_k + \frac{1}{2} \mathbf{d}_k^T \nabla_{xx}^2 \mathcal{L}(\mathbf{x}_k, \boldsymbol{\lambda}_k, \boldsymbol{\sigma}_k) \mathbf{d}_k \quad \text{s.e.} \\ & \nabla \mathbf{h}(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{d}_k + \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) = 0 \\ & \nabla \mathbf{g}(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{d}_k + \mathbf{g}(\mathbf{x}_k) \leq 0. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Siis SQP-menetelmässä ratkaistaan peräkkäin aliongelmia, joista jokainen optimoi kvadraattista mallia kohdefunktiosta linearisoimalla rajoitusyhtälöt. Tätä toistetaan ratkaisun konvergoitumiseen saakka. Menetelmää on esitelty yksityiskohtaisemmin lähteessä [22].

Yleisesti optimointitehtävien ratkaisemiseen käytetään myös heuristisia ja stokastisia menetelmiä, kuten neuroverkot, simuloitu jäähtyminen ja geneettiset algoritmit. Nämä menetelmät matkivat luonnosta löytyviä ilmiöitä ja toimivat usein monimutkaisissa tehtävissä perinteisiä menetelmiä paremmin [17]. Näitä menetelmiä voidaan hyödyntää siinä tapauksessa, kun ongelmaa ei saada ratkaistua perinteisillä menetelmillä.

3.3 Monitavoiteoptimointi

Monitavoiteoptimointi tarkoittaa nimensä mukaisesti, että kohdefunktioita on enemmän kuin yksi. Monitavoiteoptimointitehtävä voidaan määritellä

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \{ & f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x}) \} \quad \text{s.e.} \\ & g_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, \dots, k \\ & h_j(\mathbf{x}) = 0, j = 1, \dots, l \\ & \mathbf{x} \in \mathbf{S} \subset \mathbb{R}^n, \end{aligned} \tag{3.4}$$

mikä eroaa yksitavoiteoptimointitehtävän määrittelystä (3.1) vain siinä, että monitavoiteoptimointitehtävässä on $m \geq 2$ kohdefunktiota, jotka voidaan koota vektoriin $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x}))^T$. Mikäli jokin kohdefunktio fiksataan tiettyyn arvoon, se muuttuu käytännössä rajoitusehdoksi.

Kohdefunktiot ovat tyypillisesti keskenään ristiriitaisia, jolloin ei ole mahdollista löytää ratkaisua, joka olisi optimaalinen jokaiselle yksittäiselle kohdefunktiolle. Näin ollen tuloksena saadaan aina jonkinlainen kompromissi näiden välillä ja tämän vuoksi tietyssä mielessä optimaalisia ratkaisuja voi olla useita. Tyypillinen esimerkki monitavoiteoptimoinnista on tuote, josta halutaan yhtä aikaa sekä kestävä että edullinen valmistaa.

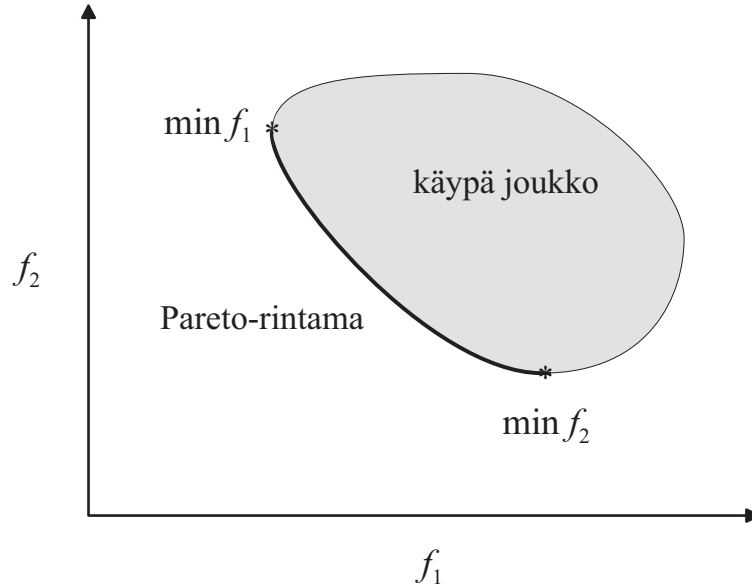
Määritellään Pareto-optimaalisuus (*Pareto optimality*) muuttujavektorille

Muuttujavektori $\mathbf{x}^* \in \mathbf{S}$ on Pareto-optimaalinen ratkaisu, mikäli ei ole olemassa muuttujavektoria $\mathbf{x} \in \mathbf{S}$ siten, että $f_i(\mathbf{x}) \leq f_i(\mathbf{x}^*)$ kaikille $i = 1, \dots, m$ ja $f_j(\mathbf{x}) < f_j(\mathbf{x}^*)$ vähintään yhdelle $j = 1, \dots, m$.

ja kohdevektorille

Kohdevektori $\mathbf{f}(\mathbf{x}^*) = (f_1(\mathbf{x}^*), f_2(\mathbf{x}^*), \dots, f_m(\mathbf{x}^*))^T$ on Pareto-optimaalinen, kun sitä vastaava muuttujavektori $\mathbf{x}^* \in \mathbf{S}$ on Pareto-optimaalinen.

Siis ratkaisu on Pareto-optimaalinen, kun minkään kohdefunktion arvoa ei voida parantaa huonontamatta jonkun toisen kohdefunktion arvoa samalla. Yleensä Pareto-optimaalisia ratkaisuja on paljon (ääretön määrä) ja tätä ratkaisujen joukkoa kutsutaan Pareto-optimaaliseksi joukoksi (Pareto-rintama, *Pareto set*, *Pareto front*). Kuvassa 3.2 on havainnollistettu Pareto-optimaalista joukkoa kahden kohdefunktion tapauksessa.



KUVA 3.2: Monitavoiteoptimoinnin tuloksena saadaan Pareto-rintama, joka kuvaa optimaalisten ratkaisujen joukkoa.

Yleensä ollaan kiinnostuneita vain Pareto-optimaalisista ratkaisuista ja muut käyvät ratkaisut jätetään huomiotta. Poikkeuksena tähän on tilanne, jossa vähintään yksi kohdefunktioista on approksimaatio tuntemattomalle funktiolle, jolloin todellinen Pareto-optimaalinen joukko on tuntematon.

Matemaattisesti ajateltuna jokainen Pareto-optimaalinen ratkaisu on yhtä hyvä ratkaisu monitavoiteoptimointiongelmaan. Käytännössä tilanne on kuitenkin toinen, ja tarvitaan päätöksentekijä (*Decision maker*, DM) eli henkilö, jolla on lisätietoa tehtävästä ja sen tavoitteista. Päätöksentekijä on yleensä asiantuntija ratkaistavan tehtävän alalla, mutta hänen ei tarvitse olla perehtynyt optimointiin. Hän pystyy valitsemaan Pareto-optimaalisten ratkaisujen joukosta käytännön tarpeisiin parhaiten soveltuvan ratkaisun tietojensa pohjalta. [16]

Monitavoiteoptimoinnissa käytetyt menetelmät voidaan luokitella päätöksentekijän roolin mukaan. Erilaisia luokkia menetelmille ovat *no-preference*-, *a posteriori*-, *a priori*- ja *interactive*-menetelmät. Näitä menetelmiä on käsitelty tarkemmin lähteessä [16].

Monitavoiteoptimointitehtävät ratkaistaan yleensä skalarisoinnilla, joka tarkoittaa ongelman muuntamista yksittäiseksi tai yksittäisten yksitavoiteoptimointiteh-

tävien joukoksi. Skalarisoinnissa painotetaan kohdefunktiot käyttäjän niille valitsemilla kertoimilla ja minimoidaan näiden painotettua summaa. Tätä *a posteriori*-menetelmää kutsutaan painokerroinmenetelmäksi (*weighting method*) ja tehtävä määritellään

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \sum_{i=1}^k b_i f_i(\mathbf{x}) \quad \text{s.e.} \\ \mathbf{x} \in \mathbf{S} \subset \mathbb{R}^n, \end{aligned} \tag{3.5}$$

missä $b_i \geq 0$ ovat painokertoimia kaikilla $i = 1, \dots, k$. Usein myös painokertoimet b_i normalisoidaan eli $\sum_{i=1}^k b_i = 1$. Tämän jälkeen ongelmalla on reaaliarvoinen kohdefunktio ja ongelman ratkaisuun voidaan käyttää pitkälle kehitettyä yksitavoiteoptimoinnin teoriaa ja tehokkaita menetelmiä. [16]

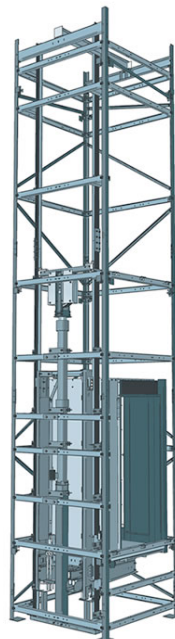
Painokertoimia b_i muuttamalla voidaan tuottaa erilaisia Pareto-optimaalisia pisteitä. Tällä menetelmällä saadaan pisteitä Pareto-optimaalisen joukon kaikilta eri alueilta vain siinä tapauksessa, että Pareto-joukko on konvekksi. Menetelmän huonona puolenä on, että skaalaustekijöiden tasainen jakauma tuottaa harvoin tasaista jakaumaa Pareto-optimaalisen joukon pisteistä edes konveksin tehtävän tapauksessa. Sopivien painokerrointen valinta on hankalaa ilman tietoa Pareto-rintaman muodosta ja pienikin muutos painokertoimissa voi aiheuttaa suuren muutoksen kohdefunktiossa. Painokertoimien valinnassa olisi hyvä pyrkiä siihen, että normalisoidut kohdefunktioiden arvot olisivat jotakuinkin samaa suuruusluokkaa. Kaiken kaikkiaan painokerroinmenetelmä on yksinkertainen tapa tuottaa pisteitä, jotka tiedetään Pareto-optimaalisiksi. [16, 23]

4. TUTKIMUSTEHTÄVÄN KUVAUS

Tutkimuksessa on tarkoitus selvittää, minkälaisia parametriyhdistelmiä kannattaa suosia tavoiteltaessa pientä johteen taipumisesta syntyvää kulmaa ja kuinka herkästi rakenteen eri parametrien muuttaminen vaikuttaa siihen. Muutettavat parametrit ovat rakenteeseen liittyviä pituusmittoja ja johteen poikkileikkaus. Tarkoituksena on kuvata rakenteen käyttäytymistä ajotilanteessa yksinkertaisella mallilla ja pohdita, kuinka hyvin malli kuvaa todellisuutta. Tätä mallia hyväksi käyttäen yritetään löytää rakenteelle optimaalinen parametriyhdistelmä, joka antaa mallin puitteissa mahdollisimman kevyen ratkaisun tarkkailtavan kulman säilyessä vaaditulla tasolla.

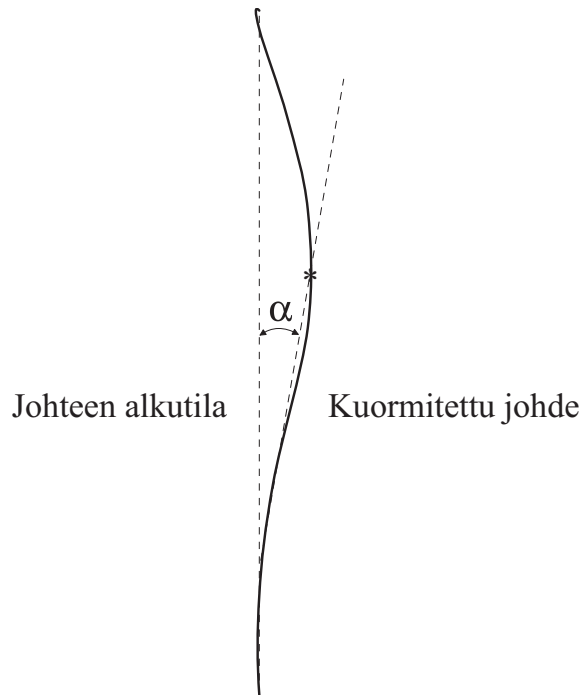
4.1 Johteen taipumisen aiheuttama kulma

Hissikori kulkee kahta johdetta pitkin rullaohjainten ohjaamana. Rullaohjaimet tukevat hissikoria sekä ylä- että alareunasta, joten hissikori on tuettu yhteensä neljästä pisteestä. Johde tuetaan joko hissikuilun seiniin tai metallikehikkoon johdekiinnikkeillä, kuten luvussa 2 on esitetty. Nämä ovat joustavia metallirakenteita, jotka tukevat johdetta tasaisin välein. Kuvassa 4.1 on esitetty hissien tukirakenne tapauksessa, jossa johteet tukeutuvat metallikehikkoon.



KUVA 4.1: Hissin rakenne, kun johteet tuetaan metalliseen palkkirakenteeseen. [24]

Hissikorin liikkuesssa johteet taipuvat syntyvien poikittaisten kuormitusten johdosta kuvan 4.2 esittämällä tavalla, jolloin johteen alkutilan ja taipuneen johteen välille muodostuu kulma α . Tämän kulman halutaan pysyvän tietyn raja-arvon alapuolella. Toisin sanoen tämä muuttuja toimii epäyhtälörajoitusehtona optimoinnissa.

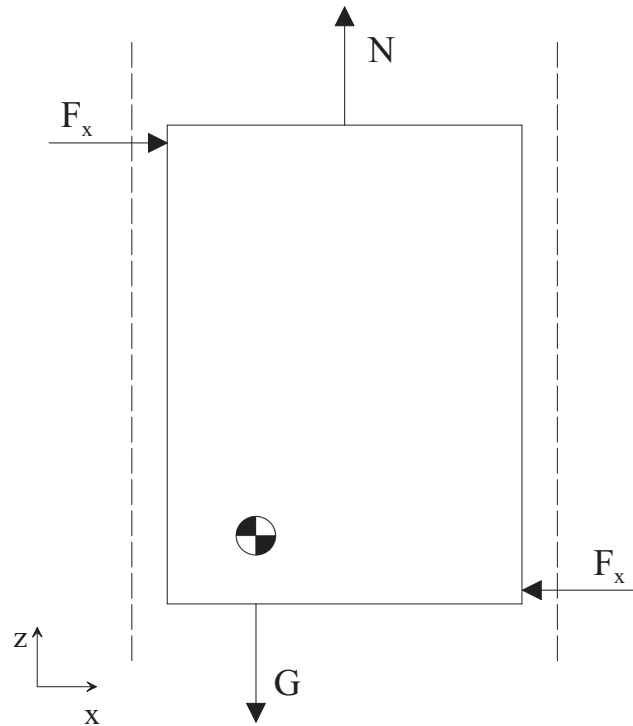


KUVA 4.2: Johde taipuu kuormituksessa.

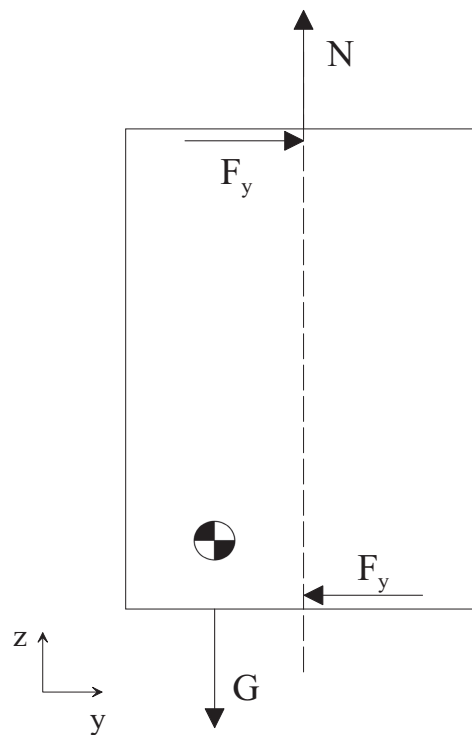
Tätä kulmaa saadaan pienennettyä lisäämällä johdekiinnikkeiden määrää tai paksuntamalla johteen poikkileikkausta. Kuitenkin tukien lisääminen ja paksujen johteiden käyttäminen lisäävät rakenteen kokonaismassaa, mikä nostaa hissien kokonaiskustannuksia.

4.2 Kulman muodostumiseen vaikuttavat kuormitukset

Tutkittavaksi kuormitustapaukseksi on valittu tilanne, jossa hissikorin massakeskipiste on lähellä hissikorin nurkkaa. Tämä tilanne on siis pahin normaalin käytön aikana esiintyvä kuormitustapaus ja antaa siten vaatimukset mitoitukselle. Hissikori pyrkii kääntymään molempien johdetta vastaan kohtisuorien akselien ympäri. Tällöin johteet estävät kääntymisen tukemalla rullaohjaimia. Newtonin III lain mukaan rullaohjain painaa johdetta samalla, mutta vastakkaissuuntaisella voimalla kuin kohde tukee hissikoria rullaohjaimen välityksellä. Kuvissa 4.3 ja 4.4 on esitetty periaatekuvat hissikorin vapaakappalekuvasta molemmissa suunnissa. Kuvissa G on hissikorin paino, N hissikoria kannatteleva vaijerivoima sekä F_x ja F_y johteista aiheutuvia tukivoimia.



KUVA 4.3: Hissikorin vapaakappalekuva xz -tasossa. Johteet on esitetty kuvassa katkovii-valla.



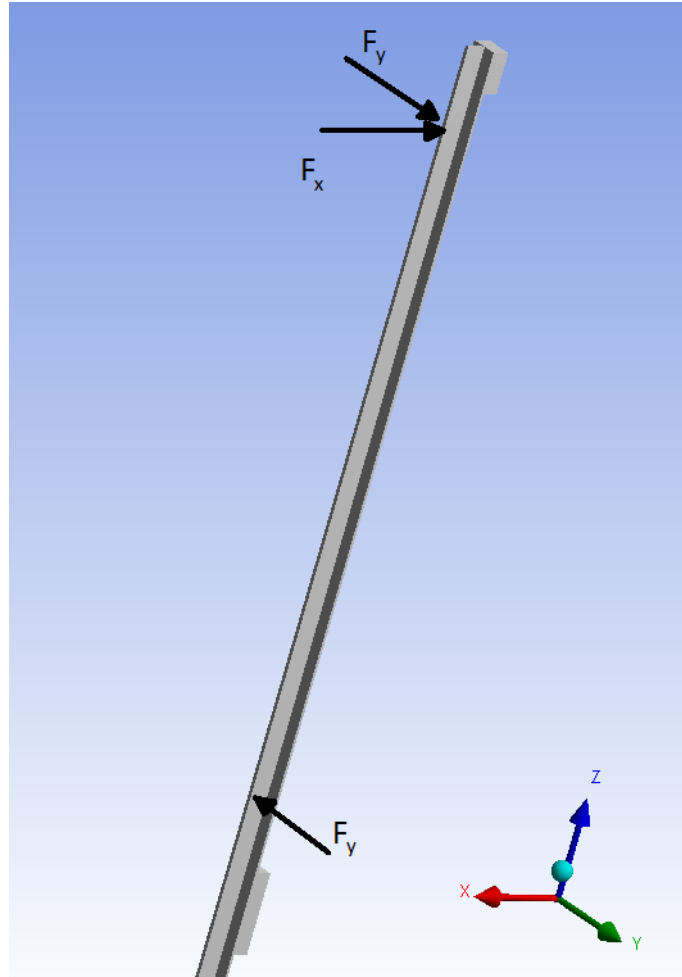
KUVA 4.4: Hissikorin vapaakappalekuva yz -tasossa. Johteet on esitetty kuvassa katkovii-valla.

Koska malli halutaan pitää tarpeeksi yksinkertaisena, tutkitaan vain puolikasta rakennetta. Toisin sanoen tarkastelun alaisena on vain toinen johde. Myös hissiko-

ri on jätetty mallista pois ja sen vaikutukset otetaan huomioon siitä aiheutuvilla kuormituksilla.

Rullaohjainten etäisyys määrittää johteeseen kohdistuvien voimien paikat. Rullaohjaimista johteisiin kohdistuvat voimat ovat tavallisessa ajotilanteessa suuruudeltaan tyypillisesti joitain satoja Newtonia. Tähän laskentaan on aiempien analyysien tulosten perusteella valittu voimien arvot $F_x = 919$ N ja $F_y = 680$ N, joissa on otettu huomioon dynaamiset efektit. Nämä voimat on saatu yhdistämällä pahimpien kuormitustapausten suurimmat voimat.

Voimat ja niiden suunnat on esitetty kuvassa 4.5. Globaali koordinaatisto on esitetty kuvan oikeassa alanurkassa. Kuten kuvasta nähdään, alemman rullaohjaimen kohdalla ei ole voimaa x -suunnassa. Todellisuudessa näiden voimien lisäksi vaikuttavat vielä rullien esikivistysvoimat. Nämä voimat ovat symmetrisiä ja oletettavasti melko pieniä verrattuna muihin vaikuttaviin voimiin, joten on päädytty jättämään näiden vaikutus huomiotta.



KUVA 4.5: Voimat ja niiden suunnat. Kuva laskentamallista.

Johteiden ja muiden tukirakenteiden oletetaan olevan rakenneterästä, jonka materiaaliarvot on listattu taulukkoon 4.1.

TAULUKKO 4.1: Analyysissä käytetyt rakenneteräksen materiaaliarvot. [25]

Kimmokerroin	200 GPa
Poissonin vakio	0.3
Tiheys	7850 kg/m ³

Alimman johteen alapää on tuettu jäykästi hissikuilun pohjalle. Rakenteen yläpää kiinnittyy hissikuilun yläosiin rajoittaen johteen pään siirtymiä ja rotaatioita.

5. LASKENTAMALLI

Laskentamalli on toteutettu ANSYS Workbench 14.5 -elementtimenetelmäohjelmistolla. Malli päädyttiin tekemään palkkielementeillä mahdollisimman tehokkaan laskentamallin saavuttamiseksi. Tällaista palkkimaista rakennetta ei ole järkevää mallintaa solidielementeillä. Myös laskentamallin solmumäärä asettaa rajoitteita, koska käytössä olevalla akateemisella lisenssillä pystyy ratkaisemaan korkeintaan 30 000 solmua sisältävän mallin.

Laskenta suoritetaan hajautettuna laskentana Techila-ympäristössä. Tampereen teknillisellä yliopistolla käytössä oleva Techila-ympäristö mahdollistaa useiden analyysien ajamisen samanaikaisesti laskentaluokan vapaita koneita ja lisenssejä hyväksikäyttäen. Techila-järjestelmä nopeuttaa laskentaa huomattavasti, kun yhden analyysin sijaan voidaan laskea samanaikaisesti kymmenittäin analyysejä.

Laskentamallissa halutaan ottaa huomioon yksittäisen johteen pituuden, johdekiinnikkeiden etäisyyden, johteen poikkileikkauksen ja rullaohjainten välimatkan vaikutukset. Laskennan robustiuden kannalta on hyvä pitäytyä niin yksinkertaisessa mallissa kuin vaatimusten puolesta on mahdollista. Tämä on tärkeää, jotta laskentamalli toimisi oikein jokaisella parametrikombinaatiolla. Etenkin optimointia ajatellen on myös pyrittävä mahdollisimman kevyeen laskentamalliin laskennallisen tehokkuuden vuoksi.

5.1 Johteiden lukumäärän vaikutus tuloksiin

Johteiden määrän vaikutusta tarkasteltaviin arvoihin tutkittiin laskemalla erikokoisia malleja vastaavilla parametriyhdistelmillä. Laskentamalli siis koostuu toisiinsa johdejatkoslevyllä peräkkäin liitetyistä johdepalkeista. Vähäisellä johteiden määrällä rakenteen päiden epärealistiset reunaehdot korostuvat liikaa johteiden käyttäytymisessä kuormituksessa. Myöskään kaikkien parametriyhdistelmien heikoimmat kohdat eivät välttämättä tule esiin pienellä määrällä, mikäli johdekiinnikkeet ja johdejatkoslevyt sattuvat sopivasti lomittain. Toisaalta liian suuren johteiden määrän käyttäminen mallissa on laskentaresurssien tuhlausta.

Taulukkoon 5.1 on listattu johteiden määrän muuttamisen vaikutus mitattavaan kulmaan. Arvot on poimittu sillä parametriyhdistelmällä, joka antaa suurimman eron vertailtavien tapausten kulman arvoon rajoitusehdon alueella. Kun johteiden määrä kasvaa, reunaehtoien aiheuttama virhe pienenee.

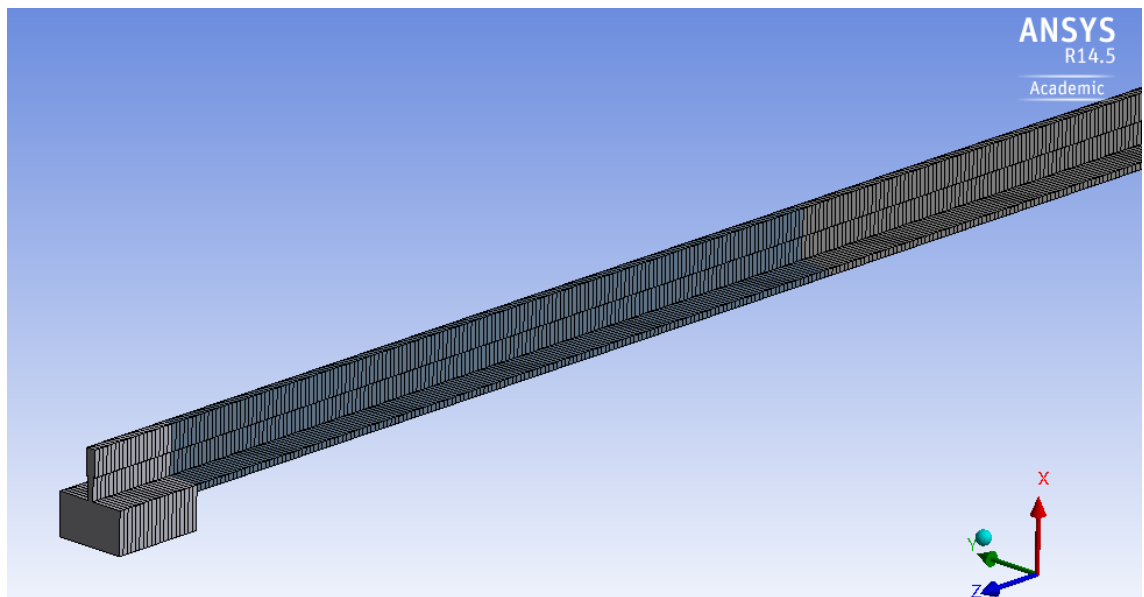
TAULUKKO 5.1: Johteiden lukumäärän vaikutus kulman arvoon rajoitusehdon alueella.

Johteiden määrän muutos	Muutoksen vaikutus
$3 \rightarrow 5$	5 %
$5 \rightarrow 6$	2.2 %
$6 \rightarrow 7$	1.0 %

Viidellä johteella ei saada näkyviin kaikkia pahimpia johdekiinnike–johdejatkoslevy-yhdistelmiä. Seitsemännen johteen lisääminen tarkoittaa vain hieman tuloksia, mutta ei tuo enää juurikaan lisäinformaatiota. Tällainen parannus tarkkuuteen hukkuu helposti muihin laskentamallissa virhettä aiheuttaviin tekijöihin. Näistä syistä laskentamalliin otetaan kuusi johdetta.

5.2 Elementtiverkko

Laskentamallin elementtiverkko koostuu palkkielementeistä, joiden pituudeksi on asetettu 10 mm. Parametrinen laskentamalli vaatii näin pienen elementtikoon, jotta muuttuvasta johteen pituudesta huolimatta löytyy aina solmu, jolle voima voidaan asettaa. Elementtiverkko on esitetty kuvassa 5.1.



KUVA 5.1: Elementtiverkko ja globaali koordinaatisto.

Elementtinä käytetään ANSYS Workbenchin automaattisesti valitsemaa 3-solmuista BEAM189-palkkielementtiä [26, 27]. Palkkielementeille luotu rakenne on viivoista koostuva malli, jossa todellista geometriaa mallinnetaan palkkien neutraaliakseleilla. Toisin sanoen palkkielementti pelkistää koko rakenteen keskiviivoiksi, joihin liitetään palkkien poikkileikkausten pintasuureet. Palkkielementit voivat ottaa vastaan normaalivoimaa, leikkausvoimaa ja taivutus- sekä vääntömomenttia.

Elementtien kokonaismäärä mallissa vaihtelee johteen pituudesta riippuen välillä 1500 – 3300 elementtiä ja solmumäärä vastaavasti välillä 3001 – 6601. Näin ollen laskentamallin ratkaiseminen onnistuu akateemisella ANSYS Workbench -lisenssillä kaikilla parametrijhdistelmillä.

5.3 Kuormitukset ja reunaehdot

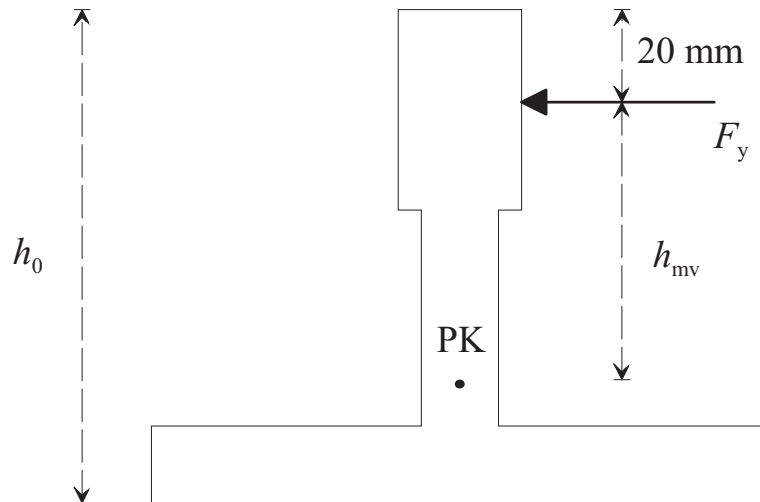
Laskennassa tarkastellaan staattisia kuormitustapauksia muuttaen kuormituspisteiden paikkaa 100 mm kerrallaan johdetta pitkin. Tämä kuvaa tilannetta, jossa hissikori laskeutuu ylhäältä alaspäin. Laskettavien pisteiden määrä on sitä suurempi mitä pidempi yksittäinen johde ja sitä myöten koko kuuden johdepalkin mittainen rakenne on. Toisaalta laskettavien pisteiden määrä pienenee rullaohjainten etäisyyden kasvaessa, koska laskenta loppuu, kun alempi rullaohjain saavuttaa alimman johteen pään. Staattisten analyysien määrä yhdessä ajossa vaihtelee näin ollen välillä 105 – 290. Staattinen laskenta ei ota huomioon hissikorin eli vaikuttavan voiman nopeutta, vaan dynaamiset efektit on otettu huomioon ennalta määritetyissä voimien arvoissa.

Voimat asetetaan molempiin johdetta vastaan kohtisuoriin suuntiin. Koska voimat kohdistuvat aina yhdelle solmulle, kuormitus on pistemäinen. Tämä kuvaa edellisessä luvussa käsiteltyä tilannetta, jossa hissikorin kulmassa oleva rullaohjain painaa johdetta vasten keskimmaisella rullalla ja toisella reunimmaisella rullalla kuvan 2.8 mukaisesti. Rullaohjaimen kontakti johteeseen on melko pistemäinen, joten solmulle kohdistuva kuormitus on hyvin perusteltu.

Palkkimallissa epäkeskeisen voiman asettaminen ei onnistu suoraan elementille. Kyseessä olevassa kuormitustapauksessa y -suuntainen voima aiheuttaa palkkiin myös vääntöä ja sen myötä palkin kiertymisen. Tämä on otettu huomioon lisäämällä kuormituspisteeseen voimien lisäksi myös vääntöä vastaava momentti. Momentin arvoa laskettaessa momenttivartena h_{mv} käytetään 50% johteen poikkileikkauksen korkeudesta h_0 kuvan 5.2 mukaisesti. Tähän on päädytty laskemalla kaikkien annettujen standardiprofilien pintakeskiön ja vaikuttavan voiman etäisyys, joka on välillä 40 – 50% profiilin korkeudesta. Siten käytetty oletus momenttivarren pituudesta on konservatiivinen.

Paikka, johon voima johteessa kohdistuu, riippuu käytettävästä rullaohjaimesta. Koska tarkempaa tietoa rullaohjainten ominaisuuksista ei ole saatavilla, rullaohjaimen oletetaan olevan riippumaton johteen poikkileikkauksesta. Laskentamallissa paikka, johon voima kohdistuu, on 20 mm johteen poikkileikkauksen yläreunasta.

Epäkeskeisen voiman käyttäminen laskentamallissa vaikuttaa myös siirtymien arvoon todellisessa kuormituspisteessä. Koska palkkielementti ilmoittaa vain neutraaliakselin siirtymän, johteen poikkileikkauksen kääntymisestä rullien kiinnittymiskohtaan syntyvä siirtymä on lisättävä laskettavaan y -suuntaisen siirtymän arvoon jäl-



KUVA 5.2: Johteen poikkileikkauksen pintakeskiö PK ja momenttivarsi h_{mv} .

keenpäin. Lisättävän siirtymän laskennassa oletetaan, ettei johteen poikkileikkaus koe muodonmuutosta vaan kiertyy jäykkänä.

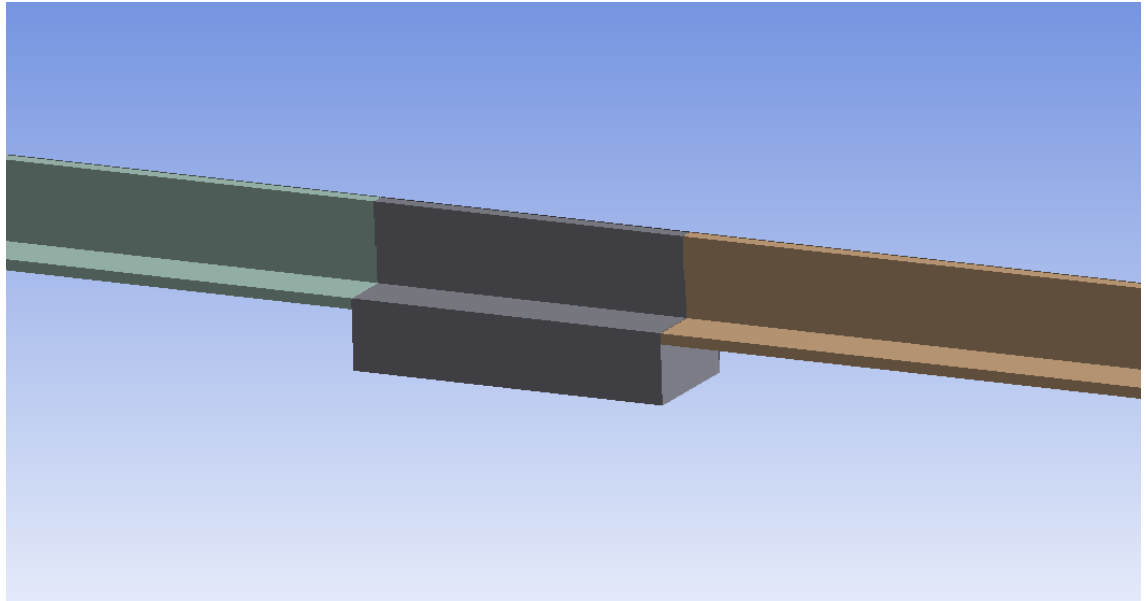
Koska johde on alapäästään kiinni hissikuilun pohjalla, laskentamallissa rakenteen toinen pää on jäykästi tuettu. Johteen yläpään siirtymät on estetty johdetta vastaan kohtisuorissa suunnissa ja rotaatiot on estetty kaikissa suunnissa. Näillä reunaehdoilla joustavin kuormituspaiste esiintyy rakenteen keskivaiheilla suurimmalla osalla parametrijohdistelmia. Tämä on oletettavasti lähellä todellista käyttäytymistä. Myös löysempiä reunaehtoja testattiin, mutta niillä suurimmat siirtymät ja kulmat esiintyivät lähes poikkeuksetta rakenteen päiden lähellä.

5.4 Johdejatkoslevy

Johteiden liitoskohdat on mallinnettu paksumpana poikkileikkauksena palkissa kuvan 5.3 mukaisesti. Tämä yksinkertaistettu johdejatkoslevy on 70 mm paksu ja 380 mm pitkä. Johdejatkoslevyn leveys on aina sama kuin liitettävien johteiden leveys.

Yhtenäisen palkin käyttäminen laskentamallissa jäykistää rakennetta hieman todellista enemmän, koska todellisuudessa liitoksessa kohtaavat johteet eivät ole kiinteästi toisissaan kiinni. Ruuviliitoksen mallintaminen ei ole tässä mittakaavassa kuitenkaan järkevää. Tämän vuoksi on selvitetty, voidaanko liitosta mallintaa kiertojousella, jonka kiertojäykkyys olisi muutettava parametri. Jousivakion parametrisointi onnistuu yhdessä suunnassa ANSYS Workbenchin *revolution joint* -kontaktilla, mutta muut suunnat jäävät jäykiksi. Koska tutkittavassa tapauksessa olisi tarvetta kahteen suuntaan kiertyvälle jouselle, tämä vaihtoehto hylättiin.

Lisäksi tutkittiin, olisiko hyvä mallintaa liitoskohta palkkielementeillä jättämällä johteiden väliin rako ja mallintaa 1 millimetrin alueelle vain johdejatkoslevyä. Tämän hieman epärealistisen mallinnuksen vaikutus oli häviävän pieni, joten päädyttiin



KUVA 5.3: Johdejatkoslevy on mallinnettu paksumpana palkkina.

pitäytymään alkuperäisessä rakenteessa, jossa sekä johde ja johdejatkoslevy että kaksi kohtaavaa johdetta ovat kiinteästi liitettynä toisiinsa.

5.5 Johdekiinnike

Johteiden tuenta johdekiinnikkeiden kautta hissikuiluun on mallinnettu johdekiinnikkeiden kohdilla olevilla kahteen suuntaan toimivilla jousilla. Näiden jousien jousivakiot on saatu erillisten FEM-analyysien (*Finite element method*, elementtimenetelmä) tuloksena. Laskennassa käytetyt jousivakioiden arvot on listattu taulukkoon 5.2 ja niiden vaikutussuunnat käyvät ilmi kuvassa 5.1 esitetystä globaalista koordinaatistosta.

TAULUKKO 5.2: Analyysissä käytetyt jousivakioiden arvot.

Suunta	Arvot (N/mm)
k_x	5000
k_y	14000

Analyysit tehtiin solidimallilla, jossa käytettiin kitkallista kontaktia johteen ja johdekiinnikkeen välillä. Laskennassa ei kuitenkaan ole huomioitu ruuvien esikieristystä, joten jousivakioiden arvot ovat varmalla puolella. Esikieristyksen puuttuminen vaikuttaa johteen siirtymään johdekiinnikkeen suhteen hieman siirtymiä kasvattaen. Tämän vaikutus on pääasiassa poikittaisessa suunnassa eikä juurikaan kontaktia vastaan kohtisuorassa suunnassa.

Johteen aksiaalinen kiertymä on estetty johdekiinnikkeen kohdalla. Muita kierelmiä ei ole rajoitettu niiden kohdalla, joten malli sallii todellista rakennetta va-

paamman muodonmuutoksen. Johdekiinnikkeiden reunaehdot ovat kokonaisuudessaan konservatiiviset.

5.6 Yksinkertaistukset

Tähän on koottu yhteenveto mallissa tehdyistä yksinkertaistuksista sekä näiden vaikutuksista laskentaan ja tuloksiin. Mallissa tehdyt konservatiiviset yksinkertaistukset:

- Johdekiinnikkeet eivät estä rotaatiota muussa kuin johteen aksiaalisuunnassa, vaikka todellisuudessa ne tukevat muitakin suuntia
- Kuormitustapauksen voimat on saatu yhdistämällä luvussa 4.2 esitettyt erillisten kuormitustapausten suurimmat voimat
- Johdekiinnikkeiden jousivakiot on laskettu kitkallisella kontaktilla ilman esikiristystä, millä on suuri vaikutus varsinkin kontaktia vastaan kohtisuorassa suunnassa
- y -suuntaisen voiman aiheuttaman momentin laskennassa on käytetty momenttivartena $h_{mv} = 0.5 \cdot h_0$ kuvan 5.2 mukaisesti
- Palkin kiertymän johdosta syntyvä y -suuntainen siirtymä lisätään laskennassa momenttivarren $h_{mv} = 0.5 \cdot h_0$ mukaan laskettuna kokonaissiirtymään

Mallissa tehdyt epäkonservatiiviset yksinkertaistukset:

- Johdejatkoslevyn ja johteen sekä kahden johteen välinen kontakti on kiinteä ja jäykkä eikä todellisuuden ruuviliitos, joka sallisi hieman löysemmän käyttäytymisen
- Rakenteen päiden reunaehdot ovat todellista jäykemmät

Suurin mallissa oleva yksinkertaistus lienee vakiovoiman käyttäminen kaikissa analyyseissä. Varsinkin hissikoriin tai sen kehikkoon kiinnitettyjen rullaohjainten etäisyyden muuttaminen vaikuttaa todellisuudessa varmasti johteista kohdistuviin tukivoimiin. Myös dynaamisten vaikutusten ottaminen huomioon vakiovoiman arvossa sekä tapauksen pelkistäminen vain toisen johteen tutkimiseen yksinkertaistaa merkittävästi todellista tilannetta. Näiden yksinkertaistusten johdosta joitakin ilmiöitä voi jäädä havaitsematta. Kaiken kaikkiaan yksinkertaistukset näyttäisivät olevan kokonaisvaikutukseltaan konservatiivisella puolella.

6. OPTIMOINTITEHTÄVÄN FORMULOINTI

Laskentamalli on parametrisoitu suunnittelumuuttujien osalta optimoinnin toteuttamiseksi. Optimointi on suoritettu käyttämällä SimPro-laskentatyökalua ja useita erilaisia sen sisältämiä menetelmiä ja optimointialgoritmeja.

6.1 Suunnittelumuuttujat

Suunnittelumuuttujia on yhteensä 9 kappaletta. Yksi näistä määrittää käytettävän poikkileikkauksen standardiprofiilien joukosta ja kolme muuta muuttujaa yksittäisen johteen pituuden, johdekiinnikkeiden välimatkan ja rullaohjainten etäisyyden. Loput muuttujat määräytyvät valitun profiilin mukaan. Näin ollen vapaita muuttujia on yhteensä 4 kappaletta.

Suunnittelumuuttujat on listattu taulukkoon 6.1. Kaikki pituusmuuttujat on asetettu saamaan arvoja 100 mm välein. Optimointi on suoritettu myös erillisissä tapauksissa tietyillä ylärajoilla yksittäisen johteen pituudelle ja diskreeteillä arvoilla johdekiinnikkeiden välimatkalle. Nämä vastaavat tilanteita, joissa saatavilla on vain korkeintaan tietyn pituisia johdepalkkeja tai esimerkiksi kerroskorkeus rajoittaa johdekiinnikkeiden paikkoja. Erillisissä tapauksissa olevat rajoitukset suunnittelumuuttujille on esitetty taulukossa 6.2.

TAULUKKO 6.1: Suunnittelumuuttujat.

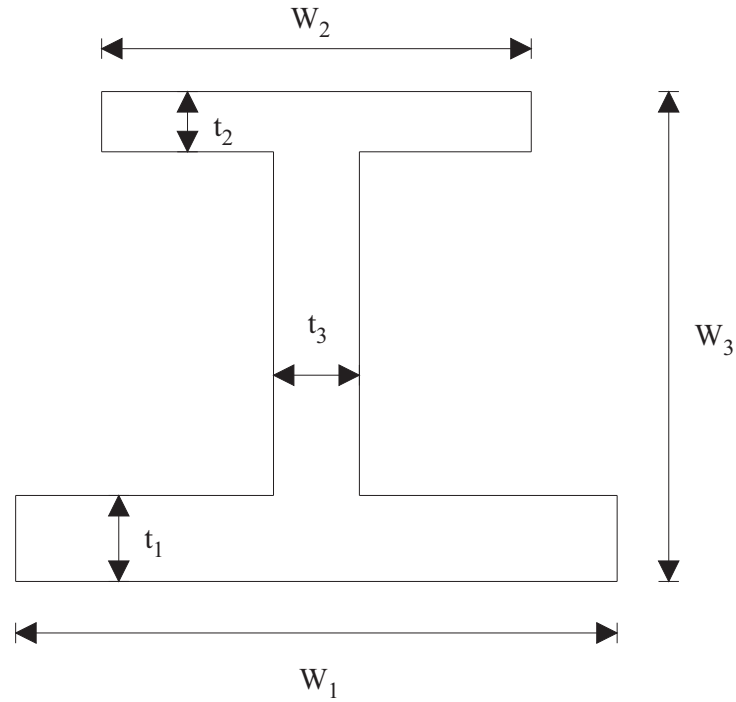
Suunnittelumuuttuja	Sallitut arvot
Johteen pituus	3.0 – 5.5 m
Johdekiinnikkeiden välimatka	1.5 – 3.5 m
Rullaohjainten etäisyys	4.0 – 7.5 m
Poikkileikkaus	T89, T114, T125, T127-1, T140-1, T140-2, T140-3

TAULUKKO 6.2: Ylärajat yksittäisen johteen pituudelle ja diskreetit arvot johdekiinnikkeiden välimatkalle.

Suunnittelumuuttuja	Sallitut arvot
Johteen pituus, yläraja	2.5, 3.5, 4.35, 5.0 m
Johdekiinnikkeiden välimatka	1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 m

Myös johdejatkoslevyn korkeutta kokeiltiin parametrisoida. Tuloksena oli, että laskenta pyrki tekemään siitä mahdollisimman ohuen. Tämä johtuu siitä, että rajoittavan ehdon eli johteen taipumisesta syntyvän kulman pienentämiseksi on edullisempaa laittaa tiheämpään johdekiinnikkeitä kuin tuoda malliin ylimääräistä massaa paksumman johdejatkoslevyn muodossa. Kuitenkaan tästä ei pysty tekemään johtopäätöstä mahdollisimman ohuen johdejatkoslevyn laittamiseksi, koska johteiden välinen kontakti on mallinnettu voimakkaasti yksinkertaistettuna. Tämän vuoksi parametri johdejatkoslevyn korkeuden muuttamiseksi jätettiin pois suunnittelu-muuttujista ja johdejatkoslevyn korkeus pidettiin vakioarvossa 70 mm.

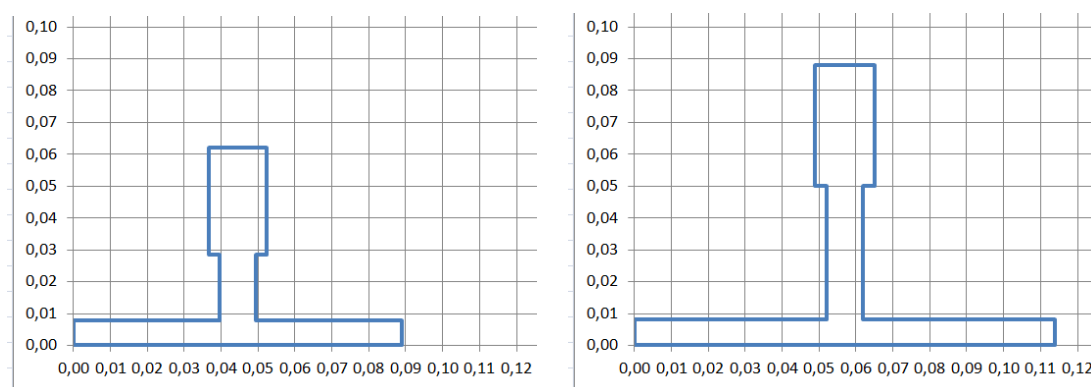
Johteen poikkileikkauksen mitat on esitetty kuvassa 6.1. Taulukko 6.3 ja kuvat 6.2, 6.3, 6.4 ja 6.5 esittävät standardiprofilien optimointitapauksiin, jossa poikkileikkaus valitaan diskreetistä standardiprofilien joukosta. Kuvien akseleiden mitat on ilmoitettu metreissä.



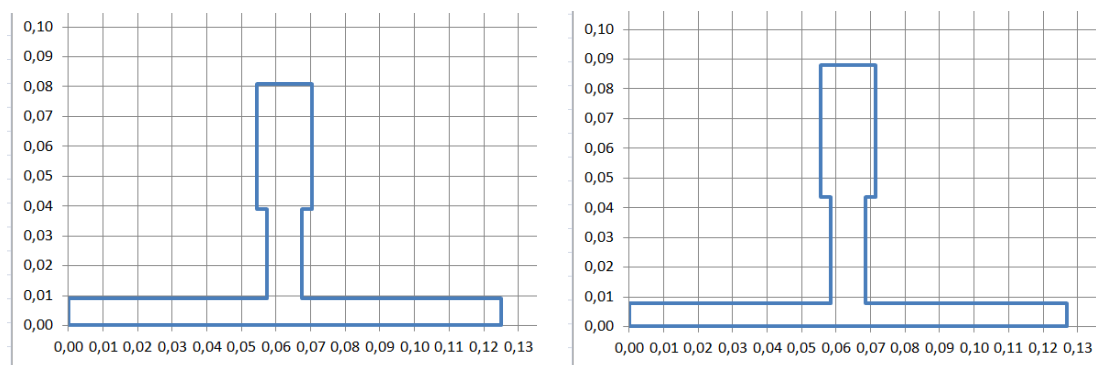
KUVA 6.1: Johteen poikkileikkauksen mitat.

TAULUKKO 6.3: Standardiprofilien mitat. [28]

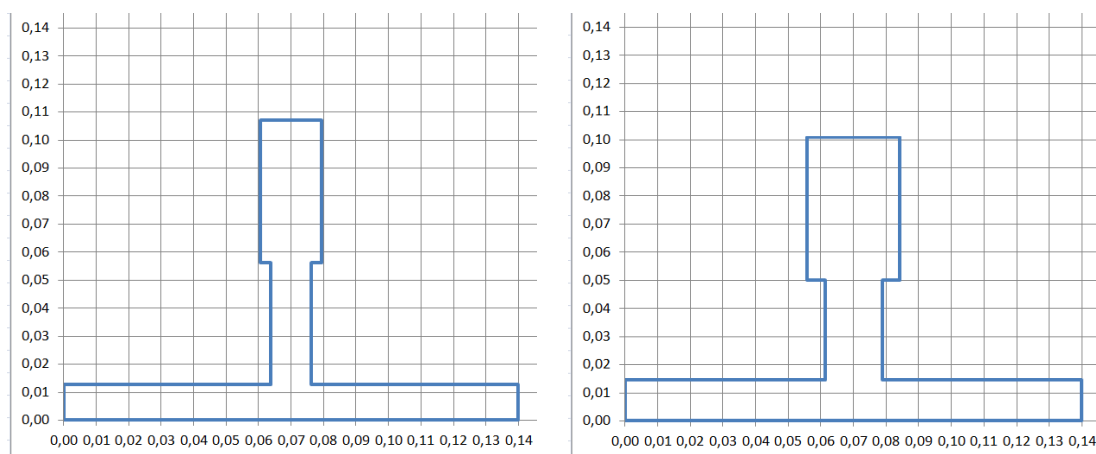
Profili	T89	T114	T125	T127-1	T140-1	T140-2	T140-3
w_1 (mm)	89	114	125	127	140	140	140
w_2 (mm)	15.88	16	16	15.88	19	28.6	31.75
w_3 (mm)	62	88	81	88	107	101	126
t_1 (mm)	7.9	8	9	7.9	12.7	14.5	17.5
t_2 (mm)	33.4	38	42	44.5	50.8	50.8	57.2
t_3 (mm)	10	10	10	10	12.7	17.5	19



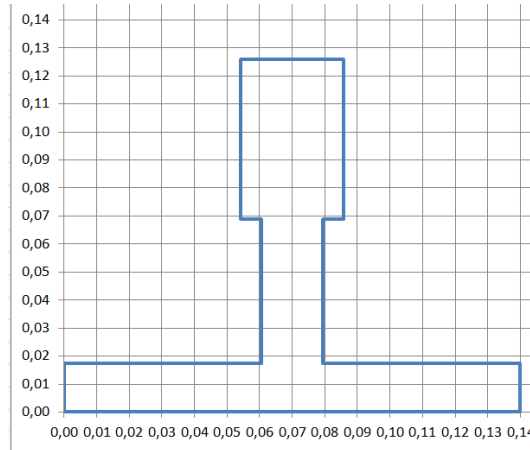
KUVA 6.2: Standardprofiilit T89 ja T114.



KUVA 6.3: Standardprofiilit T125 ja T127-1.



KUVA 6.4: Standardprofiilit T140-1 ja T140-2.



KUVA 6.5: Standardiprofiili T140-3.

Optimointi on suoritettu erillisessä tapauksessa myös käyttäen jatkuvia muuttujien arvoja kuvassa 6.1 esitetyille poikkileikkauksen mitoille. Suunnittelumuuttujien rajat tähän tapaukseen on esitetty taulukossa 6.4. Tässä tapauksessa pituusmuuttujat saavat arvoja taulukon 6.1 mukaisesti.

TAULUKKO 6.4: Rajat poikkileikkauksen muuttujille jatkuvassa poikkileikkauksessa.

Mitta	Alaraja (mm)	Yläraja (mm)
w_1	89	400
w_2	13	30
w_3	60	126
t_1	3	12
t_2	15	45
t_3	2	12

Tässä optimointitehtävässä on nyt 9 aidosti toisistaan riippumatonta muuttujaa, koska poikkileikkauksen muuttujat eivät riipu millään tavalla toisistaan. Tämä vaikuttaa optimointiin siten, että optimoitavan metamallin muodostamiseksi tarvitsee laskea enemmän pisteitä.

6.2 Kohdefunktio ja rajoitusehdot

Koska optimoinnin tarkoituksena on hakea mahdollisimman kevyttä rakennetta, optimoinnin kohdefunktioksi on valittu koko rakenteen massa suhteutettuna rakenteen pituuteen eli keskimääräinen pituusmassa. Siis kohdefunktio on

$$f = \frac{m}{l}, \quad (6.1)$$

missä m on rakenteen kokonaismassa ja l on rakenteen kokonaispituus.

Johdekiinnikkeiden massa on lisätty jälkeinpäin kokonaismassaan, koska johdekiinnikkeet ovat mallinnettu massattomina jousina. Yhtä johdetta tukevan johdekiinnikkeen massa on 20 kg.

Optimoinnin rajoitusehtoina ovat siirtymät x - ja y -suunnissa. Näitä merkitään vastaavasti symboleilla u ja v . Rajoitusehtoina toimivat myös kuormituksessa johteeseen muodostuvat kulmat α_x ja α_y . Tämä kulma on esitetty toisessa suunnassa kuvassa 4.2.

Raja-arvot ovat samat molemmissa suunnissa ja ne on esitetty taulukossa 6.5. Siirtymän sallittu arvo on suuri verrattuna rajoittavaan kulman arvoon, mikä johtaa tilanteeseen, että maksimikulma on aina aktiivinen rajoitusehto optimoinnissa.

TAULUKKO 6.5: Rajat poikkileikkauksen muuttujille jatkuvassa poikkileikkauksessa.
*Raja-arvo standardin EN81-1 mukaan [29, s.65].

Rajoitusehto	Raja-arvo
$\max u$	5 mm *
$\max v$	5 mm *
$\max \alpha_x$	α_{\max}
$\max \alpha_y$	α_{\max}

Nyt optimointitehtävä voidaan esittää standardimuodossa

$$\begin{aligned}
 & \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \quad \text{s.e.} \\
 & \mathbf{x} = (L_{\text{GR}}, L_{\text{B}}, L_{\text{R}}, \text{PL})^T \\
 & u \leq 5 \text{ mm} \\
 & v \leq 5 \text{ mm} \\
 & \alpha_x \leq \alpha_{\max} \\
 & \alpha_y \leq \alpha_{\max} \\
 & L_{\text{GR}} \in [3.0, 3.1, \dots, 5.5] \\
 & L_{\text{B}} \in [1.5, 1.6, \dots, 3.5] \\
 & L_{\text{R}} \in [4.0, 4.1, \dots, 7.5] \\
 & \text{PL} \in [\text{T89}, \text{T114}, \dots, \text{T140-3}],
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

missä L_{GR} on johteen pituus, L_{B} johdekiinnikkeiden etäisyys ja L_{R} rullaohjainten etäisyys metreinä. PL on standardiprofilien joukosta valittu poikkileikkaus.

6.3 Monitavoiteoptimointi

Tutkimuksessa on testattu monitavoiteoptimoinnin toimintaa esimerkkitapauksessa. Monitavoiteoptimoinnissa kohdefunktiot ovat yleensä ristiriitaisia, kuten kokonaismassa ja johteen taipumisesta syntyvä kulma tässä tapauksessa. Alkuperäinen

kohdefunktio keskimääräinen pituusmassa on ensimmäinen kohdefunktio ja toiseksi kohdefunktioksi on valittu maksimi kahdesta kulmasta α . Siis kohdefunktiot ovat

$$f_1 = \frac{m}{l} \quad (6.3)$$

ja

$$f_2 = \max(\max \alpha_x, \max \alpha_y), \quad (6.4)$$

missä $\max \alpha_x$ ja $\max \alpha_y$ ovat suurimmat kyseisissä suunnissa esiintyvät kulman α arvot.

Monitavoiteoptimoinnin ainoa rajoitusehto on suurin kokonaissiirtymä U , jonka raja-arvoksi on asetettu 0.7 mm. Optimointitehtävä voidaan taas koota standardimuotoon

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})\} \quad & \text{s.e.} \\ \mathbf{x} &= (L_{GR}, L_B, L_R, PL)^T \\ U &\leq 0.7 \text{ mm} \\ L_{GR} &\in [3.0, 3.1, \dots, 5.5] \\ L_B &\in [1.5, 1.6, \dots, 3.5] \\ L_R &\in [4.0, 4.1, \dots, 7.5] \\ PL &\in [T89, T114, \dots, T140-3]. \end{aligned} \quad (6.5)$$

Optimoinnin alkupiste on yksitavoiteoptimoinnissa saavutettu optimipiste.

7. TULOKSET

Tähän lukuun on koottu optimointitapausten tulokset. Lisäksi on tarkasteltu, kuinka herkkä standardiprofiileille saatu optimaalinen ratkaisu on eri parametrien arvojen muutokselle.

7.1 Optimoinnit standardiprofiileilla

Ensimmäinen huomio on, että standardiprofiili T89 ei ole käypä millään parametrijohdistelmällä, joten se on jätetty optimointitehtävästä pois poikkileikkausten joukosta.

Saavutettu optimiratkaisu vakio poikkileikkauksia käyttäen on esitetty taulukossa 7.1. Johteen poikkileikkaukseksi on valikoitunut standardiprofiili T127-1.

TAULUKKO 7.1: Optimiratkaisu standardipoikkileikkauksia käyttäen.

Suunnittelumuuttujat	Johteen pituus	5.5	m
	Johdekiinnikeiden välimatka	1.9	m
	Rullaohjainten etäisyys	5.1	m
	Poikkileikkaus	T127-1	
Rajoitusehdot	$\max \alpha_x$	84.8 %	α_{\max}
	$\max \alpha_y$	99.0 %	α_{\max}
	$\max u$	0.34	mm
	$\max v$	0.22	mm
Kohdefunktio		31.34 kg/m	

Jos johteen poikkileikkaus pakotetaan standardiprofiiliksi T114, paras ratkaisu saavutetaan taulukon 7.2 esittämällä parametrikombinaatiolla. Tämä ratkaisu antaa noin 7% suuremman arvon kohdefunktiolle kuin optimaalinen ratkaisu poikkileikkauksella T127-1.

Jos johteen poikkileikkaus pakotetaan standardiprofiiliksi T140-1, paras ratkaisu saavutetaan taulukon 7.3 esittämällä parametrikombinaatiolla. Paras ratkaisu standardiprofiilille T140-1 antaa jo yli 20% suuremman arvon kohdefunktiolle kuin optimiratkaisu standardiprofiililla T127-1.

Kaikille standardiprofiileilla lasketuille optimirakenteille on testattu, ettei kuvan 4.5 alemman rullaohjaimen kohdalle lisättävä x -suuntainen voima vaikuta ratkaisun

TAULUKKO 7.2: Optimiratkaisu poikkileikkaukselle T114.

Suunnittelumuuttujat	Johteen pituus	5.5	m
	Johdekiinnikkeiden välimatka	1.5	m
	Rullaohjainten etäisyys	6.0	m
	Poikkileikkaus	T114	
Rajoitusehdot	$\max \alpha_x$	60.5 %	α_{\max}
	$\max \alpha_y$	90.2 %	α_{\max}
	$\max u$	0.24	mm
	$\max v$	0.16	mm
Kohdefunktio		33.50 kg/m	

TAULUKKO 7.3: Optimiratkaisu poikkileikkaukselle T140-1.

Suunnittelumuuttujat	Johteen pituus	5.3	m
	Johdekiinnikkeiden välimatka	3.2	m
	Rullaohjainten etäisyys	5.6	m
	Poikkileikkaus	T140-1	
Rajoitusehdot	$\max \alpha_x$	98.1 %	α_{\max}
	$\max \alpha_y$	99.5 %	α_{\max}
	$\max u$	0.56	mm
	$\max v$	0.41	mm
Kohdefunktio		37.68 kg/m	

käyppyyteen. Toisin sanoen johteen taipuman aiheuttama kulma on sallituissa rajoissa ylimääräisen voiman lisäämisesti huolimatta. Tämä voima on suuruudeltaan $0.4 \cdot F_x$.

7.2 Rajoitetut suunnittelumuuttujat

Tapausta on optimoitu käyttäen erikseen asetettuja ylärajoja johteen pituudelle ja diskreettejä arvoja johdekiinnikkeiden etäisyydelle. Nämä erikoistapaukset kuvastavat tilanteita, joissa esimerkiksi kerroskorkeus rajoittaa johdekiinnikkeiden paikkoja tai saatavilla on vain korkeintaan tietyn mittaisia johdepalkkeja. Tulokset on järjestetty johteen pituuden ylärajan mukaan ja ne ovat esitetty taulukoissa 7.4, 7.5 ja 7.6. Tulokset ovat samat johteen pituuden ylärajoille 5.0 m ja 4.35 m, joten ne on esitetty yhdessä taulukossa.

TAULUKKO 7.4: Paras ratkaisu johteen pituuden ylärajalla 5.0 m ja 4.35 m.

Suunnittelumuuttujat	Johteen pituus	4.1	m
	Johdekiinnikeiden välimatka	2.0	m
	Rullaohjainten etäisyys	4.1	m
	Poikkileikkaus	T127-1	
Rajoitusehdot	$\max \alpha_x$	91.6 %	α_{\max}
	$\max \alpha_y$	99.1 %	α_{\max}
	$\max u$	0.37	mm
	$\max v$	0.24	mm
Kohdefunktio		32.44 kg/m	

TAULUKKO 7.5: Paras ratkaisu johteen pituuden ylärajalla 3.5 m.

Suunnittelumuuttujat	Johteen pituus	3.5	m
	Johdekiinnikeiden välimatka	2.0	m
	Rullaohjainten etäisyys	4.0	m
	Poikkileikkaus	T127-1	
Rajoitusehdot	$\max \alpha_x$	88.1 %	α_{\max}
	$\max \alpha_y$	99.8 %	α_{\max}
	$\max u$	0.36	mm
	$\max v$	0.24	mm
Kohdefunktio		33.32 kg/m	

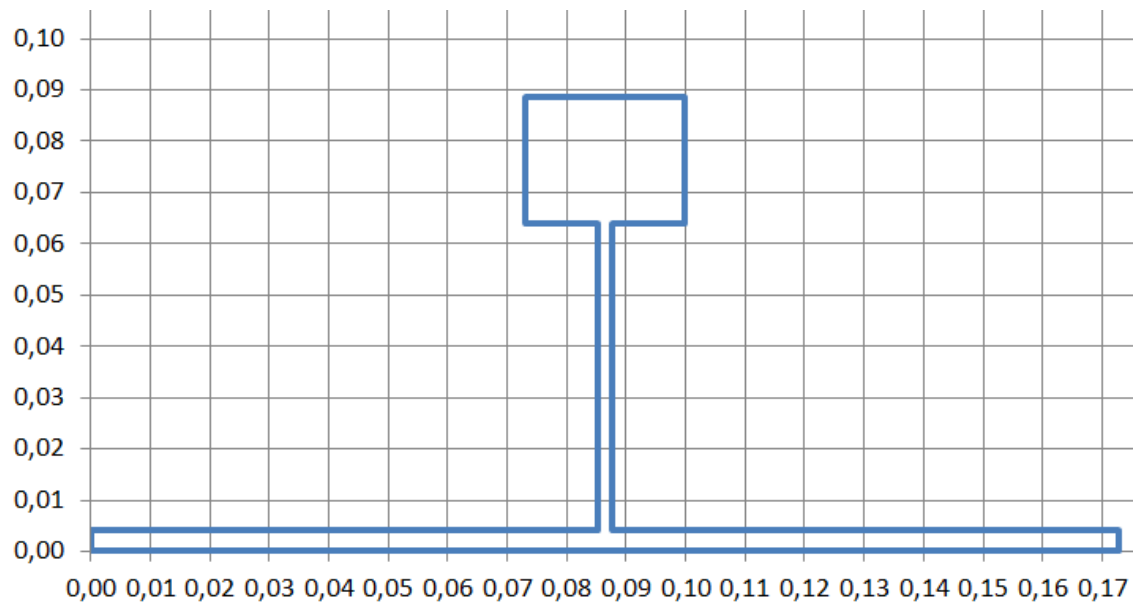
TAULUKKO 7.6: Paras ratkaisu johteen pituuden ylärajalla 2.5 m.

Suunnittelumuuttujat	Johteen pituus	2.5	m
	Johdekiinnikeiden välimatka	2.0	m
	Rullaohjainten etäisyys	6.0	m
	Poikkileikkaus	T127-1	
Rajoitusehdot	$\max \alpha_x$	86.6 %	α_{\max}
	$\max \alpha_y$	97.0 %	α_{\max}
	$\max u$	0.35	mm
	$\max v$	0.24	mm
Kohdefunktio		36.16 kg/m	

Ratkaisujen kohdefunktioiden arvoista on selvästi nähtävissä, että tulos on sitä huonompi mitä pienemmäksi johteen pituuden yläraja pakotetaan. Optimoinneissa johteen pituus myös pyrkii lähelle ylärajaa. Tuloksista nähdään myös, että kulma y -suunnassa on aktiivinen rajoitusehto kaikissa tapauksissa.

7.3 Jatkuvat arvot poikkileikkauksen mitoille

Kun poikkileikkauksen muuttujien annetaan muuttua vapaasti, saadaan noin 11% parannus kohdefunktion verrattuna optimitapaukseen diskreeteillä arvoilla poikkileikkauksen muuttujilla. Optimoinnin tuloksena saatu poikkileikkaus on esitetty kuvassa 7.1 ja sen muuttujien arvot taulukossa 7.7. Saadulle optimitulokselle esitetään taulukossa 7.8 arvot muille suunnittelumuuttujille, rajoitusehdoille ja kohdefunktiolle.



KUVA 7.1: Optimipoikkileikkaus poikkileikkauksen muuttujien saadessa jatkuvia arvoja. Akselien mitat on ilmoitettu metreinä.

TAULUKKO 7.7: Poikkileikkauksen mitat optimiratkaisussa.

Mitta	Arvo optimissa (mm)
w_1	172.9
w_2	27.0
w_3	88.6
t_1	4.0
t_2	24.5
t_3	2.2

TAULUKKO 7.8: Optimiratkaisu jatkuvilla arvoilla johteen poikkileikkauksen mitoille.

Suunnittelumuuttujat	Johteen pituus	5.5	m
	Johdekiinnikkeiden välimatka	2.1	m
	Rullaohjainten etäisyys	4.0	m
	Poikkileikkaus	Kuva 7.1	
Rajoitusehdot	$\max \alpha_x$	99.9 %	α_{\max}
	$\max \alpha_y$	99.8 %	α_{\max}
	$\max u$	0.41	mm
	$\max v$	0.23	mm
Kohdefunktio		27.92 kg/m	

Poikkileikkaus päätty optimoinnin seurauksena ohueksi ja leveäksi rakenteeksi, koska jännitykselle tai nurjahdukselle ei ole asetettu rajoitusehtoa. Kuitenkin massa keskittyy poikkileikkauksen yläosaan, koska voimat kohdistuvat rullien kautta sinne. Saatu optimipoikkileikkaus ei ole toimiva ratkaisu käytännössä, koska kyseisellä poikkileikkauksella tapahtuu hätätapauksessa helposti stabiiliuden menetys.

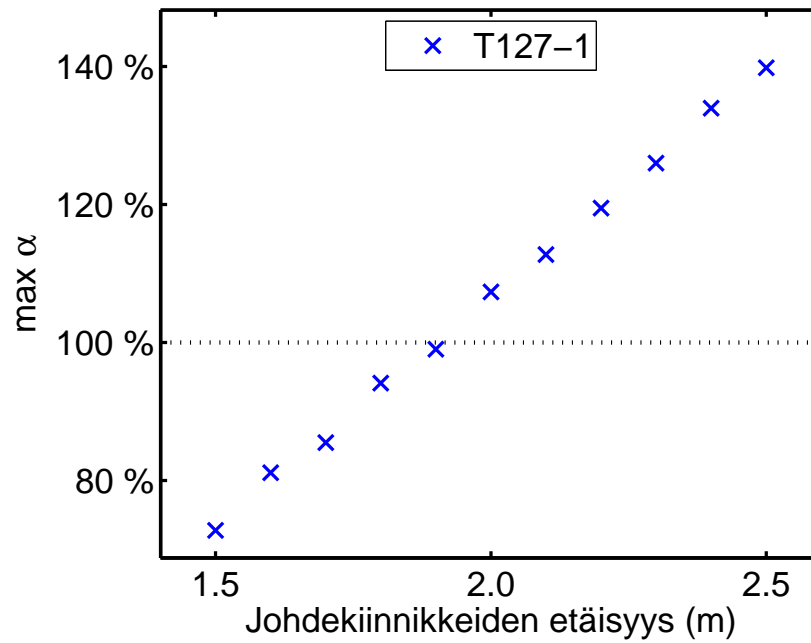
7.4 Herkkyysanalyysit

Tutkimuksessa haluttiin selvittää, kuinka herkkä optimiratkaisu on eri suunnittelumuuttujien arvon muutoksille. Tätä on tutkittu tarkastelemalla, miten yhden muuttujan arvon muuttaminen vaikuttaa rajoitusehtoon lähellä optimipistettä. Nämä herkkyysanalyysit on tehty suunnittelumuuttujille johteen pituus, johdekiinnikkeiden etäisyys ja rullaohjainten välimatka. Analyysit suoritettiin vakiopoikkileikkauksen T127-1 ja T140-1 optimiratkaisuille, jotka on esitetty taulukoissa 7.1 ja 7.2.

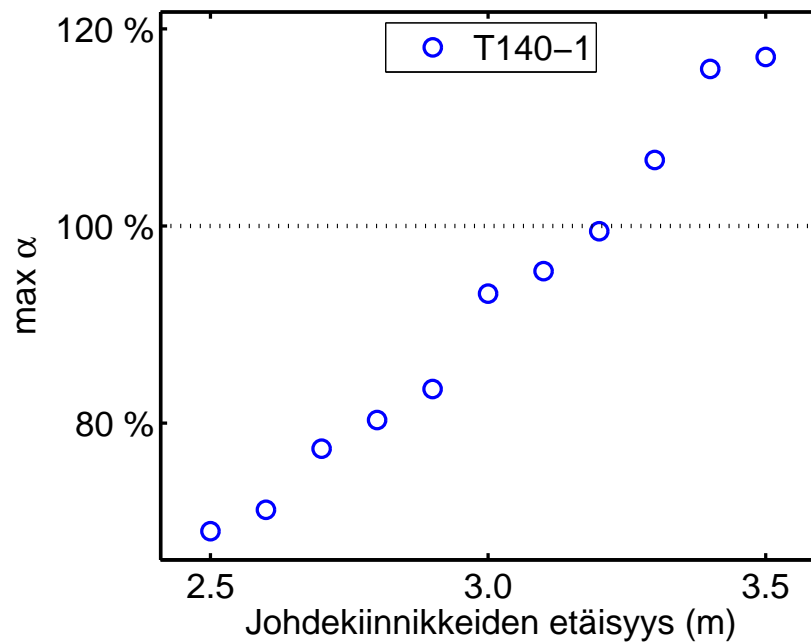
Johdekiinnikkeiden etäisyyden vaikutus rajoitusehtoon on selvästi lineaarinen, mikä käy ilmi kuvista 7.2 ja 7.3. Johdekiinnikkeiden etäisyys näyttää olevan näiden muuttujien joukossa voimakkain tekijä, joka vaikuttaa rajoitusehtoon. Rajoitusehto α_{\max} on esitetty herkkyysanalyysikuissa katkoviivalla.

Johteen pituuden vaikutus näyttäisi olevan monimutkaisempi. Kuvat 7.4 ja 7.5 esittävät tämän kummallekin tapaukselle. Poikkileikkauksen T127-1 vaste vaikuttaa melko suoraviivaiselta, mutta poikkileikkaukselle T140-1 tämä hajoaa varsin paljon, vaikka samankaltainen käyrä on havaittavissa. Pistejoukon hajoaminen profiilin T140-1 tapauksessa johtuu luultavasti melko suuresta etäisyydestä johdekiinnikkeiden välillä, minkä vuoksi reunaehtoien aiheuttamat ilmiöt vaikuttavat rajoitusehtoon enemmän. Pisteitä tarkemmin analysoitaessa selviää, että valtaosa käyrältä ylöspäin poikkeavista pisteistä esiintyy lähellä rakenteen jompaa kumpaa päätä.

Toinen selittävä tekijä on, että suuren johdekiinnikkeiden välimatkan takia kaikki johdekiinnike–johdejatkoslevy-yhdistelmät eivät tule esille ja joidenkin kombinaatioiden pahimmat tapaukset puuttuvat. Tämä selittää arvot käyrän alapuolella ku-

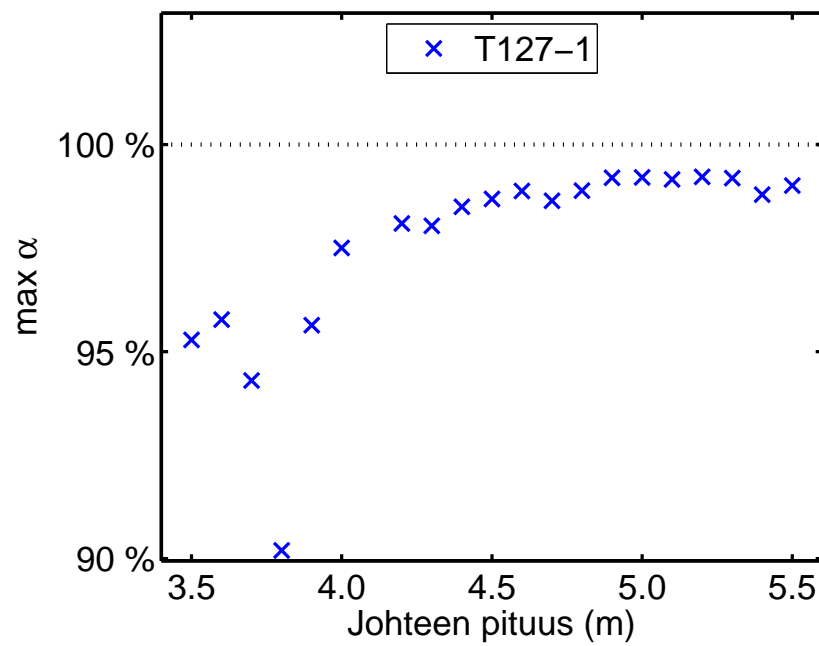


KUVA 7.2: Johdekiinnikkeiden etäisyyden vaikutus rajoittavaan kulmaan profililla T127-1.

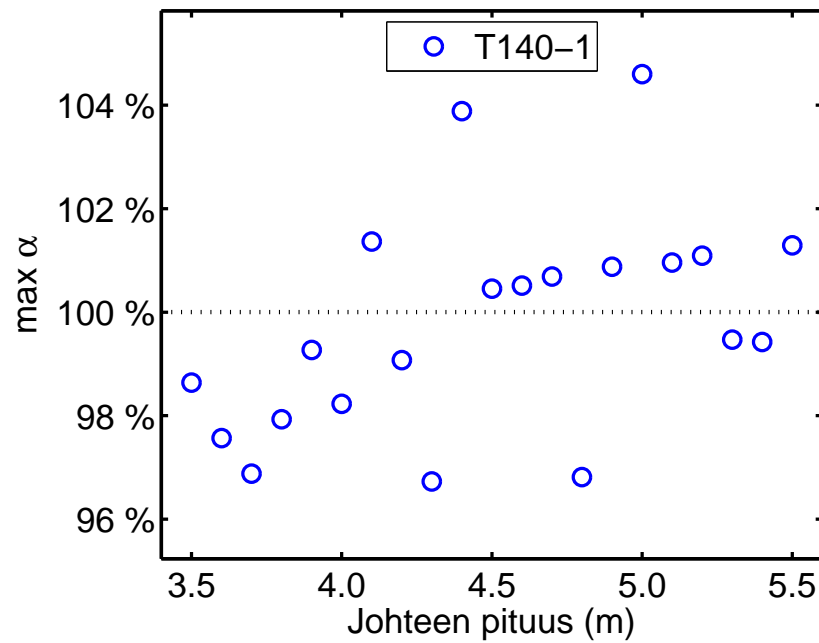


KUVA 7.3: Johdekiinnikkeiden etäisyyden vaikutus rajoittavaan kulmaan profililla T140-1.

vassa 7.5. Näiltä osin malli siis epäonnistuu löytämään kriittiset kuormituspisteet. Tästä voidaan päätellä, että suurilla johdekiinnikkeiden etäisyyksillä malli on vielä liian pieni kuvaamaan todellista rakennetta.

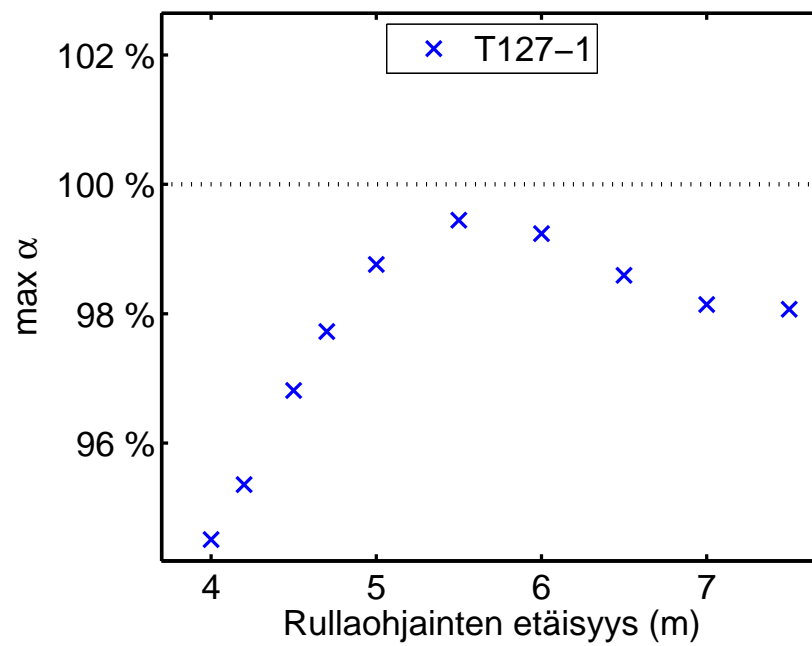


KUVA 7.4: Johteen pituuden vaikutus rajoittavaan kulmaan profililla T127-1.

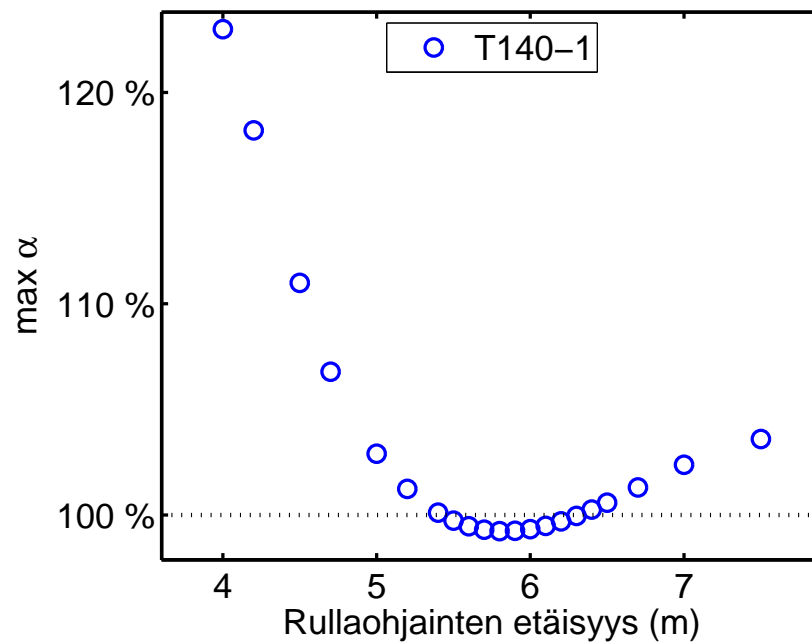


KUVA 7.5: Johteen pituuden vaikutus rajoittavaan kulmaan profililla T140-1.

Kuvat 7.6 ja 7.7 esittävät rullaohjainten etäisyyden vaikutusta rajoitusehtoon. Näiden tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että rullaohjainten etäisyydelle löytyy selkeitä alueita, joissa tarkasteltava kulma minimoituu.



KUVA 7.6: Rullaohjainten etäisyyden vaikutus rajoittavaan kulmaan profililla T127-1.



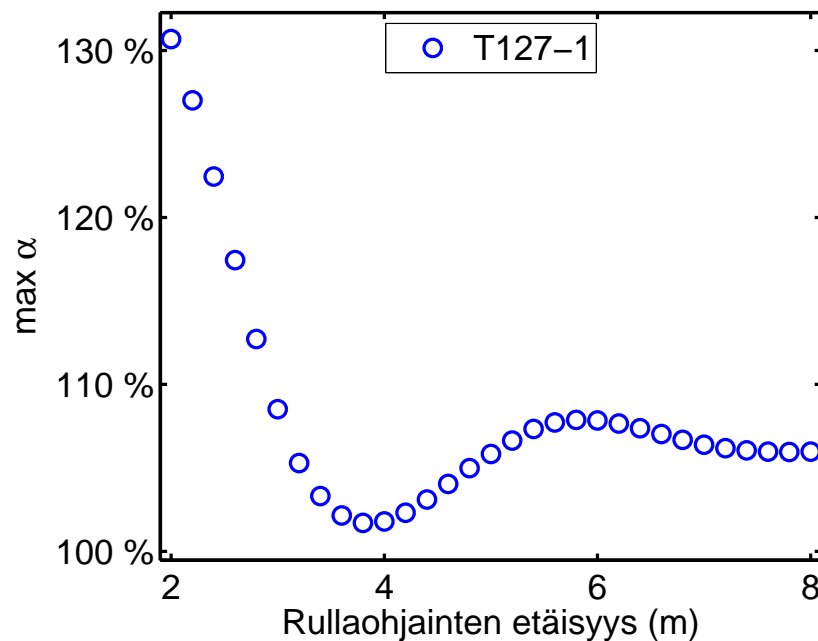
KUVA 7.7: Rullaohjainten etäisyyden vaikutus rajoittavaan kulmaan profililla T140-1.

On mielenkiintoista, että rullaohjainten etäisyyden vaikutus on vastakkaisuuntainen profileille T127-1 ja T140-1. Tämän vuoksi on tutkittu ylimääräinen tapaus, jossa halutaan selvittää ilmiö rullaohjainten etäisyyden ja johdekiinnikkeiden välimatkan välillä. Tähän tapaukseen on valittu taulukossa 7.9 esitetyt suunnittelumuuttujien arvot.

TAULUKKO 7.9: Suunnittelumuuttujien arvot ylimääräisen tapauksen laskennassa.

Suunnittelumuuttuja	Arvo
Johteen pituus	5.0 m
Johdekiinnikkeiden välimatka	2.0 m
Rullaohjainten etäisyys	2.0 – 8.0 m
Poikkileikkaus	T127-1

Rullaohjainten välimatkan vaikutusta rajoittavaan kulmaan tutkitaan siis etäisyyksillä 2.0 – 8.0 m ja tämän analyysin tulos on esitetty kuvassa 7.8.

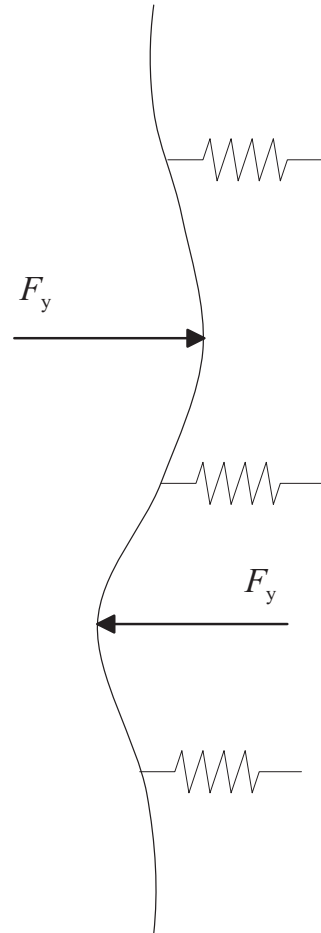


KUVA 7.8: Rullaohjainten etäisyyden vaikutus rajoittavaan kulmaan.

Tämän ylimääräisen analyysin perusteella rajoitusehto saavuttaa minimin rullaohjainten etäisyyden saadessa parillisen monikerran johdekiinnikkeiden etäisyydestä ja maksimin parittomilla monikerroilla johdekiinnikkeiden etäisyydestä. Voidaan päätellä, että optimivalinta rullaohjainten etäisyydeksi on noin kaksi kertaa johdekiinnikkeiden etäisyys.

Tämä ilmiö voidaan selittää tutkimalla tilannetta tarkemmin. Kaksi voimaa y -suunnassa vahvistavat siirtymiä rullaohjainten välimatkan ollessa pariton monikerta johdekiinnikkeiden etäisyydestä, koska voimat vaikuttavat vastakkaisiin suuntiin. Tilannetta on hahmoteltu kuvassa 7.9.

Vastaavasti voimat pienentävät siirtymiä rullaohjainten välimatkan ollessa parillinen monikerta johdekiinnikkeiden etäisyydestä. Ilmiö on sitä vahvempi, mitä lähempänä voimat ovat toisiaan. Siksi tämän mallin antama optimaalinen etäisyys rullaohjaimille on kaksi kertaa johdekiinnikkeiden etäisyys. Tämä ilmiö nojautuu vahvasti



KUVA 7.9: Voimat vahvistavat siirtymiä parittomalla johdekiinnikkeiden etäisyydellä.

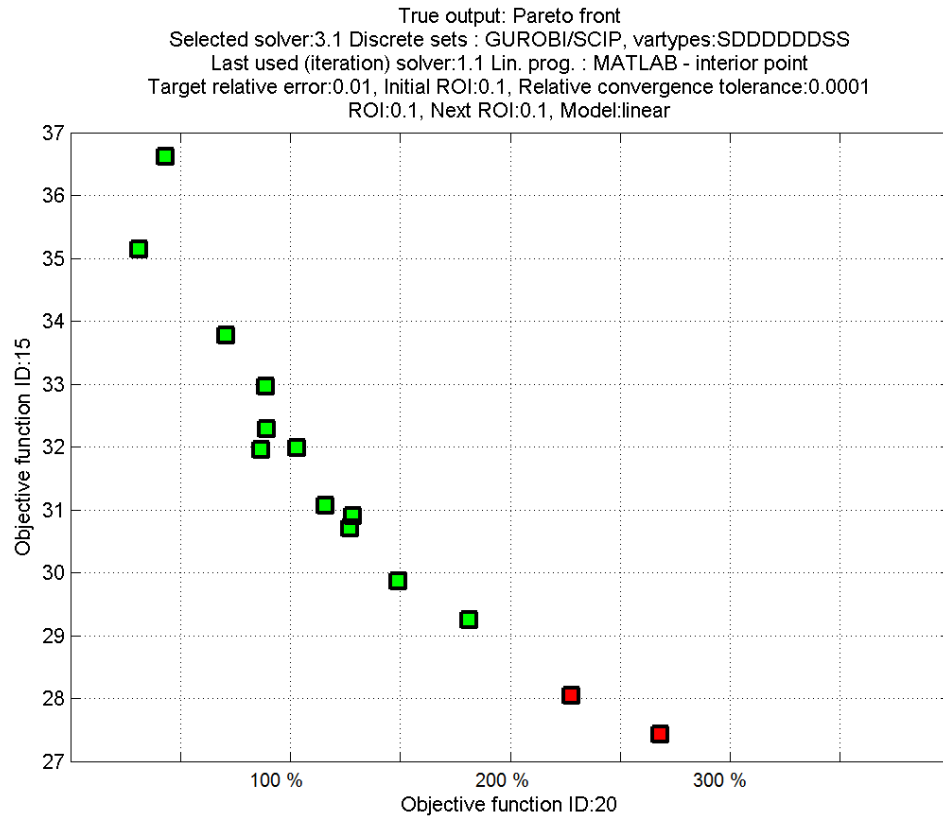
oletukseen, että voimat pysyvät vakioina riippumatta muuttuvasta rullaohjainten etäisyydestä.

7.5 Monitavoiteoptimointi

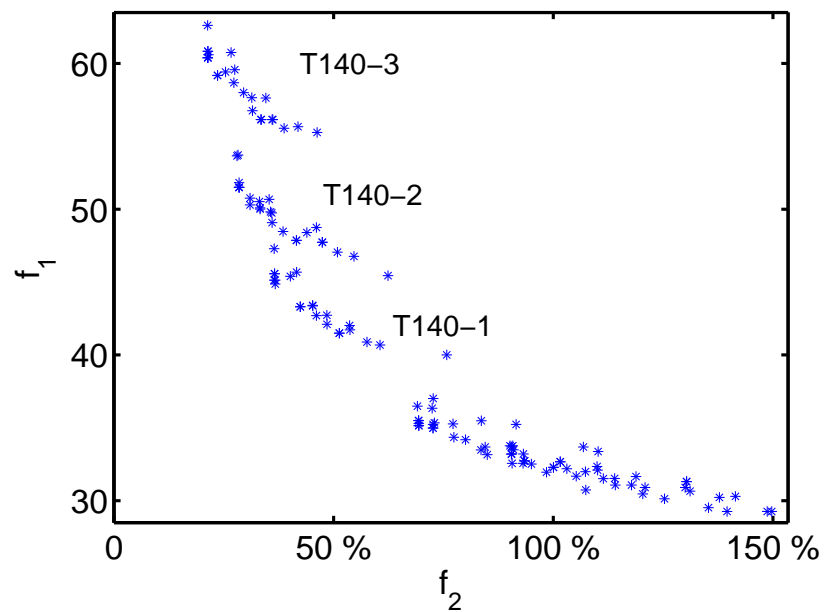
Monitavoiteoptimointi on suoritettu käyttämällä SimPro-laskentatyökalusta löytyvää, luvussa 3.3 esiteltyä painokerroinmenetelmää. Monitavoiteoptimoinnin tuloksena saadaan Pareto-rintama, joka on esitetty kuvassa 7.10. Pystyakselilla esitetty kohdefunktio ID:15 on keskimääräinen pituusmassa ja vaaka-akselilla esitetty kohdefunktio ID:20 on suurempi kulmista $\max \alpha_x$ ja $\max \alpha_y$ verrattuna sallittuun arvoon.

Kuvassa 7.11 on esitetty monitavoiteoptimoinnissa laskettuja pisteitä, joiden maksimisiirtymä on alle 0.6 mm. Kuvasta erottaa selvästi eri poikkileikkaukset. Suuremmat profiilit T140-3, T140-2 ja T140-1 löytyvät erillisinä käyrinä ja pienemmät profiilit T127-1, T125 ja T114 ovat kasaantuneet samalle alueelle. Tämän kuvan Pareto-rintaman aaltomaisesta muodosta voidaan päätellä, että optimointitehtävä ei ole konvekksi.

Tässä kohtaa tarvittaisiin päätöksentekijää päättämään, mikä kuvan 7.10 Pareto-



KUVA 7.10: Pareto-rintama. Punaiset pisteet ovat epäkäypä.



KUVA 7.11: Monitavoiteoptimoinnissa laskettuja pisteitä.

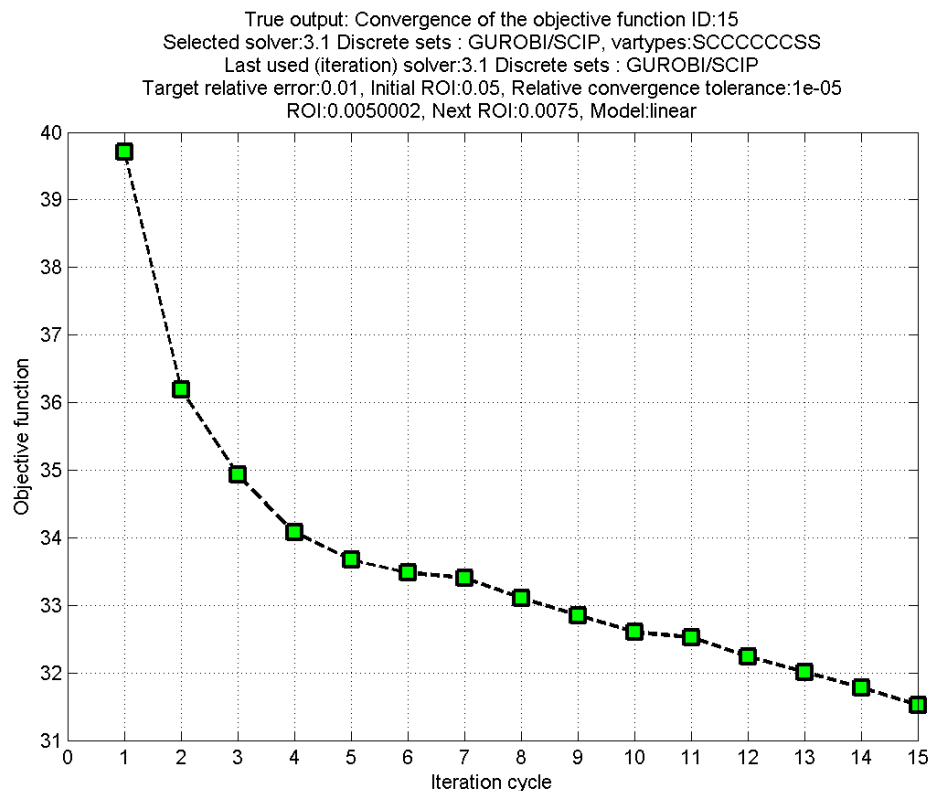
optimaalisista pisteistä on paras ratkaisu kyseessä olevaan ongelmaan. Koska tällaista henkilöä ei ole saatavilla, tyydytään tuloksena saatuun Pareto-käyrään.

7.6 SimPro-laskentatyökalun käyttäminen

Edellä esitetyt tulokset on saatu käyttämällä SimPro-laskentatyökalua. Työkalua on hyvin selkeää ja suoraviivaista käyttää, kun on tietoinen sen ominaisuuksista. Optimoinnissa tarvittavat tiedot syötetään lomakkeeseen, minkä jälkeen laskentatyökalu huolehtii optimoinnista, eikä käyttäjän halutessaan tarvitse tehdä muuta. SimPro-laskentatyökalun ominaisuuksia, sen käyttämistä sekä käytettävissä olevien optimointialgoritmien vertailua erilaisilla asetuksilla on käsitelty kattavasti lähteessä [1].

Laskentatyökalua kehitettiin ja testattiin tämän diplomityön aikana. Tämän vuoksi työkaluun lisättiin ominaisuuksia syntyvien tarpeiden mukaan. Tällainen tarve oli esimerkiksi diskreettien toisistaan riippuvien suunnittelumuuttujien käyttäminen, jota tarvittiin standardipoikkileikkauksilla tehtyihin optimointeihin.

Laskentatyökalu tulostaa optimoinnin edetessä joka iteraatiolla tietoa optimoinnin etenemisestä, mikä helpottaa huomaamaan ajoissa tilanteet, joissa optimointi ei jostain syystä etene haluttuun suuntaan. Tämä myös tekee optimoinnin seuraamisesta mielenkiintoista. Tulokset ja optimoinnin edetessä syntyvä muu data tallennetaan suoraan MATLAB-muuttujiin, mikä tekee mahdollisesta datan jälkikäsittelystä vaivatonta. Kuvassa 7.12 on esitetty kohdefunktion konvergenssikäyrä eräästä optimointitapauksesta.



KUVA 7.12: Kohdefunktion konvergenssikäyrä eräästä optimointitapauksesta.

Monitavoiteoptimointia tehdessä testattiin useita erilaisia laskentatyökalun sisältämiä monitavoiteoptimointialgoritmeja. Parhaiten tähän tehtävään toimi lineaarinen skalarisointi eli painokerroinmenetelmä. Tätä menetelmää käyttäen pystyttiin muodostamaan selkeä kuva tehtävän Pareto-rintamasta. Monitavoiteoptimointiominaisuuksia käyttäen saatiin myös visuaalisesti esitettävää lisätietoa eri standardipoikkileikkausten vaikutuksesta kohdefunktioihin.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä on tutkittu, minkälaisia parametriyhdistelmiä johteelle ja sen tukirakenteeseen liittyviin suureisiin kannattaa suosia hissin suunnittelussa. Tutkimuksen tuloksena saatu optimaalinen ratkaisu on esitetty taulukossa 7.1. Tähän ratkaisuun päästiin käyttämällä standardiprofilia T127-1. Lisäksi optimoitiin tapauksia erilaisilla rajoitteilla johteen pituudelle ja johdekiinnikkeiden välimatkalle. Nämä tulokset on esitetty luvussa 7.2.

Tutkimuksen perusteella johdekiinnikkeiden välinen etäisyys on suurin tekijä, joka vaikuttaa johteen taipumisesta syntyvään kulmaan α . Pienellä johdekiinnikkeiden välimatkalla on mahdollista käyttää jopa profilia T114. Tämä ei kuitenkaan ole optimaalista, koska paras ratkaisu profilille T114 antaa noin 7% suuremman kohdefunktion arvon kuin optimiratkaisu profilille T127-1. Siis ei ole tehokasta käyttää ohutta profilia ja suurta määrää johdekiinnikkeitä, mikäli halutaan keventää rakennetta.

Toisaalta jos halutaan käyttää paksumpaa poikkileikkausta, johdekiinnikkeiden välimatka voi olla melko suuri. Profililla T140-1 välimatka voi olla yli 3 m ja profileilla T140-2 ja T140-3 vieläkin suurempi. Tietenkin tämä vaikuttaa voimakkaasti kohdefunktioon ja paras ratkaisu profilille T140-1 antaa kohdefunktiolle yli 20% suuremman arvon kuin optimiratkaisu profilille T127-1.

On syytä huomata, että suurimmalle osalle tapauksista rajoittava kulma α esiintyy y -suunnassa. Tämä johtuu pääosin siitä, että kuormitustapauksessa on kaksi voimaa y -suunnassa ja vain yksi voima x -suunnassa kuvan 4.5 mukaisesti. Kaikille standardiprofileilla lasketuille optimirakenteille on testattu, ettei kuvan 4.5 alemman rullaohjaimen kohdalle lisättävä x -suuntainen voima (suuruudeltaan $0.4 \cdot F_x$) vaikuta ratkaisun käypyyteen.

Tutkimuksen tulosten perusteella olisi hyvä valita rullaohjainten välimatka noin kaksi kertaa johdekiinnikkeiden etäisyyden suuruiseksi. Todellisuudessa voimat eivät kuitenkaan ole riippumattomia rullaohjainten etäisyydestä, kuten laskennassa on oletettu. Rullaohjainten etäisyyden vaikutus voimiin lienee niin voimakas, että löydetty ilmiö häviää sen rinnalla. Löydetyn ilmiön vaikutus rajoittavaan kulmaan on kuitenkin vain korkeintaan 5% luokkaa.

Nämä analyysit myös paljastavat, että johteen lyhentäminen ei ole tehokas keino pienentää kulmaa α . Tutkittaessa johteen pituuden vaikutusta kulmaan selvisi, että

malli on joillain parametriyhdistelmillä liian pieni kuvaamaan todellista rakennetta ja pahimmat kuormitustapaukset jäävät paljastumatta. Tämä ongelma ilmeni suurella etäisyydellä johdekiinnikkeiden välillä, jolloin kaikki mahdolliset johdekiinnike–johdejatkoslevy-yhdistelmät eivät tulleet lasketuksi.

Jatkuvilla muuttujilla poikkileikkauksessa saatiin optimaalinen rakenne noin 11% kevyemmäksi verrattuna optimaaliseen rakenteeseen standardiprofiileilla. Tämä saatu poikkileikkaus on hyvin ohut ja leveä, koska jännitykselle tai nurjahdukselle ei ollut minkäänlaista rajoitetta. Näiden tekijöiden vuoksi saatu poikkileikkaus ei toimisi käytännössä.

Esimerkkitapaus monitavoiteoptimoinnista osoittaa selvästi, kuinka vahvasti poikkileikkauksen muuttaminen vaikuttaa pituusmassaan isommilla standardiprofiileilla. Kuitenkin toinen kohdefunktio, maksimikulma, pysyy jotakuinkin samalla tasolla sopivalla muuttujien valinnalla. Pienemmillä profiileilla (T114, T125 ja T127-1) vaikutus ei ole niin merkittävä ja kaikki nämä profiilit pystyvät antamaan kelvollisen kompromissin pituusmassan ja maksimikulman välillä.

SimPro-laskentatyökalu osoittautui toimivaksi ja käytännölliseksi työkaluksi tämän kaltaisiin rakenteen optimointiongelmiin. Työkalu on selkeä ja helppokäyttöinen sekä antaa paljon erilaista tietoa optimoinnin edetessä. Tämä tekee optimoinnin seuraamisesta mielenkiintoista ja auttaa huomaamaan hyvissä ajoin tilanteet, joissa optimointi syystä tai toisesta ei etene haluttuun suuntaan. Lisäksi laskentatyökalun monitavoiteoptimointiominaisuudet antoivat lisätietoa ratkaistavasta ongelmasta.

On syytä huomata, että nämä tulokset on saatu yksinkertaistetulla laskentamallilla. Yksinkertaistukset, kuten jäykkä kontakti johteiden välillä, vaikuttavat jonkin verran tuloksiin. Hissikorin ja toisen johteen ottaminen mukaan malliin, muuttuvan voiman käyttäminen vakiovoiman sijaan ja dynaamisten vaikutusten huomioon ottaminen johtaisi realistisempiin tuloksiin. Myös mahdollinen rullaohjainten etäisyyden kasvattamisesta aiheutuva lisäkustannus olisi hyvä ottaa mukaan kohdefunktion, mikä jätettiin tässä tutkimuksessa täysin huomiotta. Joka tapauksessa nämä tulokset antavat valistuneen arvauksen, kuinka todellinen rakenne käyttäytyy hissin käytön aikana.

LÄHTEET

- [1] Laakkonen P. Laskentatyökalun kehittäminen kantavien rakenteiden optimointiin. Master's thesis, Tampereen teknillinen yliopisto, 2014. 132 p.
- [2] Koc S. *et al.* Design parameters and stress analysis of elevator guide rail brackets. *Elevator Technology* 17, pages 177–185, 2010.
- [3] KONE Oyj, internet, viitattu 4.6.2014. Saatavissa: <http://download.kone.com/ultrarope/index.htm>.
- [4] Keiichiro N. ja Yoshinori N. Guide rail support structure for elevator system, Otis Elevator Company. 13.7.1990. Pat. EP 0372574 A1.
- [5] KONE Oyj, internet, viitattu 30.6.2014. Saatavissa: <http://cdn.kone.com/www.kone.fi/Images/fi-kone-ekotehokkaat-ratkaisut.pdf>.
- [6] Usha Martin Co., internet, viitattu 25.6.2014. Saatavissa: <http://www.ushamartin.com/pdf/power/Elevator-Ropes.pdf>.
- [7] Tianjin Winstak Co., internet, viitattu 25.6.2014. Saatavissa: <http://www.winstak.com/article/list-8.html>.
- [8] Sanayi A. Elevator guide rails installation and alignment. *Elevator World*, 50 (9):102–105, 2002.
- [9] YENER Elevator, internet, viitattu 24.6.2014. Saatavissa: <http://www.mpyener.com/en/urunler.asp?katid=3id=18>.
- [10] Sun L. ja Cilderman J. Elevator guide rail mounting arrangement, Otis Elevator Company. 30.1.1981. (13.4.1982.) 5 p. Pat. US 4324360.
- [11] Demirsoz R. *et al.* Finite element analysis of elevator guide rails during safety gear operation. *Elevator Technology* 15, *Proc. of ELEVCN'2005*, pages 41–50, 2005.
- [12] Imrak C.E. *et al.* Experimental stress analysis of guide rails. *Elevator Technology* 16, *Proc. of ELEVCN'2006*, pages 111–119, 2006.
- [13] Wittur Group, internet, viitattu 24.6.2014. Saatavissa: <http://www.wittur.com/website/product.aspx?id=188pkey=13fl=>.
- [14] Bazaraa M.S, Sherali H.D., ja Shetty C.M. *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2006.

- [15] Snyman J.A. *Practical Mathematical Optimization*. Springer, 2005. ISBN 0-387-24348-8.
- [16] Miettinen K. *Nonlinear Multiobjective Optimization*. International Series in Operations Research & Management Science. Kluwer Academic Publishers, 1998. ISBN 0-7923-8278-1.
- [17] Silvennoinen R. Matemaattinen optimointiteoria 2 -kurssin luentomoniste, 2004. Saatavissa: <http://math.tut.fi/courses/73125/>.
- [18] Wolpert D.H. ja Macready W.G. No free lunch theorems for optimization. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 1(1):67–82, 1997.
- [19] Haataja J. *Optimointitehtävän ratkaiseminen*. CSC - Tieteellinen laskenta Oy, 2004. ISBN 952-9821-95-6.
- [20] Burer S. ja Letchford A.N. Non-convex mixed-integer nonlinear programming: A survey. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 17(2): 97–106, 2012.
- [21] Heinonen O. Vastinpintamenetelmän soveltaminen lujuuslaskennassa. Master's thesis, Tampereen teknillinen yliopisto, 2011. 61 p.
- [22] Boggs P.T. ja Tolle J.W. Sequential quadratic programming. *Acta Numerica*, 4:1–51, 1995. ISSN 1474-0508. Saatavissa: http://journals.cambridge.org/article_S0962492900002518.
- [23] Das I. ja Dennis J.E. A closer look at drawbacks of minimizing weighted sums of objectives for pareto set generation in multicriteria optimization problems. *Structural optimization*, 14(1):63–69, 1997.
- [24] Stannah Lifts Co., internet, viitattu 23.7.2014. Saatavissa: <http://www.stannahlifts.co.uk/passenger-lifts/maxilift/fx-structure-supported-options.asp>.
- [25] Salmi T. ja Pajunen S. *Lujuusopin perusteet*. Pressus Oy, Tampere, 2010. ISBN 978-952-9835-67-6.
- [26] ANSYS R14.5. Ansys workbench user's guide. Sähköisessä muodossa olevat manuaalit.
- [27] Ibrahimbegović A. On finite element implementation of geometrically nonlinear reissner's beam theory: three-dimensional curved beam elements. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 122(1):11–26, 1995.

- [28] International Standard. *ISO 7465 Passenger lifts and service lifts – Guide rails for lift cars and counterweights – T-type*, 2007.
- [29] European Committee for Standardization. *EN 81-1 Safety rules for the construction and installation of lifts - Part 1 : Electric lifts*, 1998.